

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

А. ЭЙНШТЕЙН

ФИЗИКА

**И
РЕАЛЬНОСТЬ**

СБОРНИК СТАТЕЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА 1965

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

А. ЭЙНШТЕЙН

СЕРИЯ

РЕАЛЬНОСТЬ

СЕРИЯ СТАТЬ

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
Б. Г. КУЗНЕЦОВ

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
Б. Г. КУЗНЕЦОВ

Составитель У. И. ФРАНКФУРТ

НАУКА
МОСКВА 1958



A. Einstein

ПРИНЦИПЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ПРИНЦИПЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Разрешите, прежде всего, принести вам свою глубокую благодарность за оказанную услугу, наиболее ценную из тех, которую можно оказать такому человеку, как я. Избраением в вашу Академию вы меня освободили от волнений и забот службы и позволили полностью посвятить себя занятиям наукой. Заверяю вас в своем чувстве благодарности и настойчивости моих усилий, даже если плоды моих трудов покажутся вам неприметными.

Позвольте мне в связи с этим сделать несколько общих замечаний о месте, которое занимает область моей деятельности, теоретическая физика, по отношению к физике экспериментальной. Один знакомый математик полусуто сказал мне недавно: «Математик уже кое-что может, но, разумеется, как раз не то, что от него хотят получить в данный момент». Аналогично ведет себя часто физик-теоретик, приглашенный дать совет физику-экспериментатору. В чем причина этой характерной неприспособленности?

Для применения своего метода теоретик в качестве фундамента нуждается в некоторых общих предположениях, так называемых принципах, исходя из которых он может вывести следствия. Его деятельность, таким образом, разбивается на два этапа. Во-первых, ему необходимо отыскать эти принципы, во-вторых — развивать вытекающие из этих принципов следствия. Для выполнения второй задачи он основательно вооружен еще со школы. Следовательно, если для некоторой области, т. е. совокупности взаимосвязанностей, первая задача решена, то следствия не заставят себя ждать. Совершенно иного рода первая из названных задач, т. е. установление принципов, могущих служить основой для дедукции. Здесь не существует метода, который можно было бы выучить и систематически применять для достижения цели. Исследователь должен, скорее, выведать у природы четко формулируемые общие принципы, отражающие определенные общие

черты совокупности множества экспериментально установленных фактов.

Если такая формулировка удалась, начинается развитие следствий, которые часто дают непредвиденные соотношения, ведущие далеко за пределы области фактов, из которых были получены принципы. Но до тех пор, пока принципы, могущие служить основой для дедукции, не найдены, отдельные опытные факты теоретику бесполезны; ибо он не в состоянии ничего предпринять с единичными эмпирически установленными общими закономерностями. Наоборот, он застывает в беспомощном состоянии перед единичными результатами эмпирического исследования до тех пор, пока не раскроются принципы, которые он сможет сделать основой для дедуктивных построений.

В подобном положении находится в настоящее время теория, касающаяся законов теплового излучения и молекулярного движения при низких температурах. Лет 15 тому назад не сомневались в том, что, исходя из приложенной к молекулярному движению механики Галилея — Ньютона и теории электромагнитного поля Максвелла, можно правильно описать электрические, оптические и тепловые свойства тел. И вот Планк показал, что для установления соответствующего опытам закона теплового излучения нужно воспользоваться методом расчета, несовместимостью которого принципам классической механики становилась все более ясной. Этим методом расчета Планк ввел в физику так называемую квантовую гипотезу, которая за прошедшее с тех пор время была блестяще подтверждена. Этой гипотезой он отверг классическую механику для случаев, когда достаточно малые массы движутся с достаточно малыми скоростями и достаточно большими ускорениями, так что сегодня мы можем рассматривать установленные Галилеем и Ньютоном законы только как предельные. Но несмотря на усилия теоретиков, до сих пор не удалось заметить принципы механики другими, которые бы соответствовали планковскому закону теплового излучения и гипотезе квантов. Хотя установлено несомненно, что теплота сводится к движению молекул, мы должны признать, что находимся по отношению к основным законам этого движения в том же положении, в котором до Ньютона астрономы находились по отношению к законам движения планет.

Я только что указал на совокупность фактов, для теоретического рассмотрения которых отсутствуют принципы. Но можно указать также случай, когда четко сформулированные принципы ведут к следствиям, которые полностью или почти полностью выходят за рамки явлений, доступных в настоящее время исследованию. Чтобы узнать, соответствуют ли в этом случае принципы теории истине, понадобится, может быть, многолетняя экспериментальная исследовательская работа. Такой случай представляет нам теория относительности.

Анализ основных представлений о пространстве и времени показал, что установленный в оптике движущихся тел закон постоянства скорости света в вакууме отнюдь не принуждает принять теорию некоторого неподвижного эфира. Напротив того, нужно построить общую теорию, учитывающую то обстоятельство, что проведенные на Земле опыты ничего не могут сказать о поступательном движении Земли. При этом используется принцип относительности, который гласит: вид законов природы не меняется, если от начальной (принятой за таковую) системы координат перейти к другой, обладающей относительно первой равномерным поступательным движением. Эта теория получила достойные упоминания экспериментальные подтверждения и привела к упрощению теоретического изложения совокупности фактов, уже приведенных в соответствие друг с другом.

Вместе с тем, с теоретической точки зрения, эта теория не дает полного удовлетворения, потому что сформулированный выше принцип относительности отдает предпочтение равномерному движению. Если верно, что с физической точки зрения равномерному движению нельзя приписывать абсолютного смысла, то возникает вопрос — нельзя ли распространить это утверждение и на неравномерные движения? Оказывается, что если положить в основу таким образом обобщенный принцип относительности, то можно достигнуть вполне определенного развития теории относительности. Это приводит к общей теории тяготения, включающей динамику. Но пока отсутствует фактический материал, на котором можно было бы проверить обоснованность введения положенного в основу принципа.

Мы установили, что индуктивная физика ставит дедуктивной, а дедуктивная физика — индуктивной вопросы, решение которых требует напряжения всех сил. Пусть объединенными усилиями удастся вскоре добиться решающих успехов!

ПРИНЦИПЫ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Храм науки — строение многосложное. Различны пребывающие в нем люди и приведшие их туда духовные силы. Некоторые занимаются наукой с гордым чувством своего интеллектуального превосходства; для них наука является тем подходящим спортом, который должен им дать полноту жизни и удовлетворение честолюбия. Можно найти в храме и других: они приносят сюда в жертву продукты своего мозга только в утилитарных целях. Если бы посланный богом ангел пришел и изгнал из храма всех людей, принадлежащих к этим двум категориям, то храм бы катастрофически опустел, но в нем все-таки остались бы еще люди как прошлого, так и нашего времени. К ним принадлежит и наш Планк, и поэтому мы его любим.

Я хорошо знаю, что мы только что с легким сердцем изгнали многих людей, построивших большую, возможно даже наибольшую, часть науки; по отношению ко многим принятое решение было бы для нашего ангела горьким. Но одно кажется мне несомненным: если бы существовали только люди, подобные изгнанным, храм не поднялся бы, как не мог бы вырасти лес из одних лишь выходящих растений. Этих людей удовлетворяет, собственно говоря, любая арена человеческой деятельности; станут ли они инженерами, офицерами, коммерсантами или учеными, это зависит от внешних обстоятельств. Но обратим вновь свой взгляд на тех, кто удостоился милости ангела. Большинство из них люди странные, замкнутые, уединенные; несмотря на эти общие черты они в действительности сильнее разнятся друг от друга, чем изгнанные. Что привело их в храм? Нелегко на это ответить, и ответ, безусловно, не будет одинаковым для всех. Как и Шопенгауэр, я, прежде всего, думаю, что одно из наиболее сильных побуждений, ведущих к искусству и науке, — это желание уйти от будничной жизни с ее мучительной жестокостью и безутешной пустотой, уйти от уз веч-

но меняющихся собственных прихотей. Эта причина толкает людей с тонкими душевными струнами от личного бытия вовне в мир объективного видения и понимания. Эту причину можно сравнить с тоской, неотразимо влекущей горожанина из окружающей его шумной и мутной среды к тихим высокогорным ландшафтам, где взгляд далеко проникает сквозь неподвижный чистый воздух, тешась спокойными очертаниями, которые кажутся предназначенными для вечности.

Но к этой негативной причине добавляется позитивная. Человек стремится каким-то адекватным способом создать в себе простую и ясную картину мира; и это не только для того, чтобы преодолеть мир, в котором он живет, но и для того, чтобы в известной мере попытаться заменить этот мир созданной им картиной. Этим занимаются художник, поэт, теоретизирующий философ и естествоиспытатель, каждый по-своему. На эту картину и ее оформление человек переносит центр тяжести своей духовной жизни, чтобы в ней обрести покой и уверенность, которые он не может найти в слишком тесном головокружительном круговороте собственной жизни.

Какое место занимает картина мира физиков-теоретиков среди всех возможных таких картин? Благодаря использованию языка математики эта картина удовлетворяет наиболее высоким требованиям в отношении строгости и точности выражения взаимозависимостей. Но зато физик вынужден сильнее ограничивать свой предмет, довольствуясь изображением наиболее простых, доступных нашему опыту явлений, тогда как все сложные явления не могут быть воссозданы человеческим умом с той точностью и последовательностью, которые необходимы физику-теоретику. Высшая аккуратность, ясность и уверенность — за счет полноты. Но какую прелесть может иметь охват такого небольшого среза природы, если наиболее тонкое и сложное малодушно и боязливо оставляется в стороне? Заслуживает ли результат такого скромного занятия гордое название «картины мира»?

Я думаю, — да, ибо общие положения, лежащие в основе мысленных построений теоретической физики, претендуют быть действительными для всех происходящих в природе событий. Путем чисто логической дедукции из них можно было бы вывести картину, т. е. теорию всех явлений природы, включая жизнь, если этот процесс дедукции не выходил бы далеко за пределы творческой возможности человеческого мышления. Следовательно, отказ от полноты физической картины мира не является принципиальным.

Отсюда вытекает, что высшим долгом физиков является поиск тех общих элементарных законов, из которых путем чистой дедукции можно получить картину мира. К этим законам ведет не логический путь, а только основанная на проникновении в суть опыта интуиция. При такой неопределенности методики можно думать, что существует произвольное число равноценных систем

теоретической физики; это мнение в принципе определено верно. Но история показала, что из всех мыслимых построений в данный момент только одно оказывается преобладающим. Никто из тех, кто действительно углублялся в предмет, не станет отрицать, что теоретическая система практически однозначно определяется миром наблюдений, хотя никакой логический путь не ведет от наблюдений к основным принципам теории. В этом суть того, что Лейбниц удачно назвал «предустановленной гармонией». Именно в недостаточном учете этого обстоятельства серьезно упрекают физики некоторых из тех, кто занимается теорией познания. Мне кажется, что в этом корень и прошедшей несколько лет назад полемики между Махом и Планком.

Горячее желание увидеть эту предустановленную гармонию является источником настойчивости и неистощимого терпения, с которыми, как мы видим, отдался Планк общим проблемам науки, не позволяя себе отклоняться ради благодарных и легче достижимых целей. Я часто слышал, что коллеги приписывали такое поведение необычайной силе воли и дисциплине; но мне представляется, что они не правы. Душевное состояние, способствующее такому труду, подобно религии или влюбленности: ежедневное старание проистекает не из какого-то намерения или программы, а из непосредственной потребности.

Он сидит здесь, наш дорогой Планк, и внутренне посмеивается над этим моим ребяческим манипулированием фонарем Диогена. Наша симпатия к нему не нуждается в банальном обосновании. Пусть любовь к науке украсит и дальше ему жизнь и приведет его к разрешению им самим поставленной и значительно продвинутой важнейшей физической проблемы нашего времени. Пусть ему удастся объединить квантовую механику, электродинамику и механику в логически единую систему.

ПРЕДИСЛОВИЕ К НЕМЕЦКОМУ ИЗДАНИЮ КНИГИ ЛУКРЕЦИЯ «О ПРИРОДЕ ВЕЩЕЙ»¹

Книга Лукреция окажет чарующее действие на каждого, кто еще не покорен окончательно духом нашего времени, кто чувствует себя способным со стороны взглянуть на современность и оценить духовные достижения современников. Мы узнаем, как представлял себе мир мыслящий человек, интересовавшийся естествознанием, — человек, одаренный живым чувством и способностью мыслить, но не имевший никакого понятия о тех достижениях современного естествознания, которые нам сообщаются в детском возрасте, еще тогда, когда мы не в состоянии ни осознать их, ни критически противостоять им.

Глубокое впечатление должна оставить твердая уверенность Лукреция, верного ученика Демокрита и Эпикура, в познаваемости и, соответственно, каузальной зависимости всего сущего. Приписывая атомам лишь геометрико-механические свойства, он не только совершенно убежден в возможности объяснения всего происходящего в мире на основе подчиняющегося определенным законам движения неизменяемых атомов, но даже думает, что может обосновать это утверждение. Как явления жизни, так и воспринимаемые чувствами тепло, холод, цвет, запах, вкус сводятся к движениям атомов. Душу и ум он представляет себе состоящими из особо легких атомов; будучи последовательным, он сопоставлял определенные переживания с различными свойствами материи.

Освобождение человека от насаждаемого религией и суевериями рабского страха, поддерживаемого и используемого священниками — вот главная цель работы Лукреция. Это нешуточное дело.

¹ T. Lucretius Carus. De rerum natura. Berlin. Bd. II. Издание вышло в двух томах. В первом томе воспроизведен латинский текст, во втором дан немецкий перевод, к которому и написано предисловие Эйхштейна. — Прим. ред.

Но скорее всего им руководила потребность убедить своих читателей в необходимости принятия механической атомистической картины мира, хотя он и не рискнул высказать это открыто склонным к практицизму римлянам. Трогательно его уважение к Эпикуру и вообще к греческой культуре и греческому языку; он их ставил значительно выше латинских. То, что такие вещи можно было тогда высказать, следует поставить римлянам в заслугу. Где современная нация, которая питает столь благородные чувства к другой современной ей нации и высказывает их?

Стихи Дильса¹ так легко читаются, что забываешь о том, что перед тобой перевод.

Берлин, июнь 1924.

¹ Переводчик.— Прим. ред.

МЕХАНИКА НЬЮТОНА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

На этих днях исполняется 200 лет со времени кончины Ньютона. Мы должны восстановить в памяти образ этого блестящего гения; он указал Западу пути мышления, экспериментальных исследований и практических построений, как никто другой ни до, ни после него. Ньютон не только создал отдельные гениальные ведущие методы; он в совершенстве владел всем известным в его время эмпирическим материалом и был исключительно избирателен в нахождении математических и физических доказательств. По всему этому он заслуживает нашего высокого уважения. Но фигура Ньютона означает больше, чем это вытекает из его собственных заслуг, ибо самой судьбой он был поставлен на поворотном пункте умственного развития человечества. Чтобы себе образно это представить, вспомним, что до Ньютона не существовало законченной системы физической причинности, системы, которая как-то отражала бы более глубокие черты внешнего мира.

Правда, еще древнегреческие материалисты выдвигали требование сведения всего происходящего в материальном мире к строго обусловленным законам движениям атомов; при этом воля живых существ как самостоятельная причина совершенно исключалась. И Декарт по-своему ставил себе эту цель, но его стремление оставалось смелым желанием, проблематичным идеалом философской мысли. Однако до Ньютона вряд ли существовали те фактические результаты, которые могли бы обосновать мечту о полной физической причинности.

Цель Ньютона заключалась в том, чтобы дать ответ на вопрос: существует ли простое правило для полного вычисления движения небесных тел нашей планетной системы по заданному состоянию движения всех этих тел в один определенный момент времени? Выведенные Кеплером из наблюдений Тихо Браге эмпирические законы движения планет уже были известны и требовали своего

объяснения. Сегодня каждый знает, какое огромное, поистине чудное, трудолюбие требовалось, чтобы установить эти законы по эмпирически найденным орбитам. Но мало кто себе представляет гениальность метода, с помощью которого Кеплер определил истинные орбиты, исходя из кажущихся, т. е. из наблюдавшихся с Земли направлений. Эти законы дают полное описание движения планеты вокруг Солнца: эллиптическую форму орбит, равенство секториальных скоростей, отношение между большими полуосьями и периодами обращения. Но эти законы не удовлетворяли требованию причинного объяснения. Они представляли собой три логически независимых друг от друга правила, лишенных всякой внутренней связи. Третий закон количественно нельзя было безоговорочно перенести на другое, отличное от Солнца, центральное тело (не существует, например, никакой связи между периодом обращения планеты вокруг Солнца и периодом обращения спутника вокруг своей планеты). Но самое главное заключается в том, что эти законы относятся к движению в целом и *не позволяют вывести из заданного состояния движения другое состояние, во времени непосредственно следующее за первым*. По современной терминологии мы бы сказали, что они являются законами интегральными, а не дифференциальными.

Дифференциальный закон является той единственной формой причинного объяснения, которая может полностью удовлетворять современному физика. Ясное понимание дифференциального закона есть одно из величайших духовных достижений Ньютона. Но необходима была не только идея о законе, но и математический формализм, который, правда, существовал в зачатке, но которому нужно было придать систематическую форму. Ее-то и нашел Ньютон в дифференциальном и интегральном исчислении. Не будем обсуждать здесь вопроса, пришел ли Лейбниц независимо от Ньютона к тем же математическим методам или нет. Во всяком случае их развитие было для Ньютона необходимостью, ибо только они давали способы выражения его мыслей.

Важный шаг к познанию законов движения был сделан еще Галилеем. Он нашел закон инерции и закон свободного падения в поле тяготения Земли: масса (точнее, материальная точка), на которую не действуют другие массы, движется равномерно и прямолинейно. Вертикальная скорость свободно падающего тела возрастает в поле тяжести пропорционально времени. Сегодня нам может казаться, что только небольшой шаг отделяет результаты Галилея от законов Ньютона. Но все-таки следует отметить, что оба вышеприведенных утверждения Галилея по форме относятся к движению в целом, тогда как закон движения Ньютона отвечает на вопрос: как меняется состояние движения материальной точки за бесконечно малое время под действием внешней силы? Только переход к рассмотрению явления за бесконечно малое время (т. е. к дифференциальному закону) позволил Ньютону дать формули-

ровку, пригодную для любого движения. Понятие о силе он заимствовал из статики, которая к тому времени была достаточно хорошо развита. Установление связи между силой и ускорением становится возможным только после введения нового понятия массы, которое, впрочем, обосновывается только кажущимся определением. Мы сегодня настолько привыкли к образованию понятий, соответствующих производным, что вряд ли в состоянии оценить ту огромную силу абстракции, которая нужна была для установления общего дифференциального уравнения движения путем двукратного перехода к пределу, тем более, если учесть, что при этом необходимо было найти еще понятие массы. Но этим далеко еще не было достигнуто причинное понимание явлений движения. Уравнение движения только тогда определяет само движение, когда задана сила. Ньютоном владела навеянная закономерностями движения планет мысль, что действующая на некоторую массу сила зависит от положения всех остальных масс, расположенных достаточно близко от рассматриваемой. Только после установления этой зависимости было получено окончательное причинное объяснение явлений движения. Каким образом, исходя из кеплеровых законов движения планет, Ньютон разрешил эту задачу для тяготения и этим показал тождественность силы тяжести и сил, действующих на небесные тела, общеизвестно. Только совокупность

(закон движения) плюс (закон тяготения)

образует ту замечательную систему мыслей, которая в случае, когда явления происходят под действием одной лишь силы тяготения, позволяет по заданному в определенный момент состоянию движения найти предшествующие и последующие состояния.

Логическая замкнутость системы понятий Ньютона обусловлена тем, что в качестве единственной причины ускорения масс некоторой системы выступают эти же массы.

На основе изложенного Ньютону удалось объяснить до мельчайших деталей движения планет, Луны и комет, явление приливов и отливов, прецессионное движение Земли. Это был дедуктивный труд, исключительный по своей грандиозности. Особенно замечательным должно было казаться выяснение того факта, что причина движения небесных тел тождественна столь привычной нам из повседневной жизни силе тяжести.

Но значение трудов Ньютона заключается не только в том, что им была создана практически применимая и логически удовлетворительная основа собственно механики, а и в том, что до конца XIX в. эти труды служили программой всех теоретических исследований в физике. Все физические явления сводились к массам, подчиняющимся законам движения Ньютона. Следовало только расширить закон силы, приспособив его к рассматриваемому кругу явлений. Сам Ньютон пытался осуществить эту программу в оптике, считая, что свет состоит из частиц, обладающих

инерцией. После того как законы движения Ньютона были применены к непрерывно распределенным массам, ими пользовались и в волновой оптике.

Исключительно на законах движения Ньютона основывалась и кинетическая теория тепла, которая не только подготовила умы к познанию закона сохранения энергии и глубокому пониманию сущности второго начала термодинамики, но и дала подтвержденную до тонкостей на опыте теорию газов. Учение об электричестве и магнетизме до новейшего времени также всецело развивалось под влиянием направляющих идей Ньютона (электрическая и магнитная субстанции, силы дальнего действия). Даже произведенный Фарадеем и Максвеллом в электродинамике и оптике переворот, означавший первый после Ньютона крупный принципиальный шаг в развитии основ теоретической физики, был совершен под влиянием идей Ньютона. Максвелл, Больцман, лорд Кельвин неустанно пытались сводить электромагнитные поля и их динамические взаимодействия к механическим явлениям в непрерывно распределенных гипотетических массах. Но вследствие бесплодности, или, по крайней мере, малой плодотворности этих усилий, к концу XIX в. постепенно совершался переворот в основных представлениях; теоретическая физика переросла рамки ньютоновских идей, которые на протяжении почти двух столетий служили ей опорой и идейным руководством.

Основные принципы Ньютона были с логической точки зрения столь удовлетворительными, что импульс к их обновлению мог возникнуть только под давлением результатов опыта. Прежде чем перейти к этому вопросу, я должен подчеркнуть, что Ньютон знал слабости построенной им системы лучше, чем последующие поколения ученых. Это обстоятельство всегда вызывало во мне чувство почтительного удивления; поэтому я хотел бы на нем остановиться.

1. Хотя всюду заметно стремление Ньютона представить свою систему как необходимо вытекающую из опыта и вводить возможно меньше понятий, не относящихся непосредственно к опыту, он тем не менее вводит понятия абсолютного пространства и абсолютного времени. В наше время это ему часто ставили в упрек. Но именно в этом пункте Ньютон особенно последователен. Он обнаружил, что наблюдаемые геометрические величины (расстояния между материальными точками) и их изменения во времени в физическом смысле не характеризуют полностью движения. Это положение он доказывает своим знаменитым опытом с ведром. Следовательно, кроме масс и изменяющихся во времени расстояний между ними, существует еще нечто, что определяет происходящие события; это «нечто» он воспринимал как отношение к «абсолютному пространству». Ньютон понимал, что его законы могут иметь смысл только если пространство обладает физической реальностью в той же мере, как материальные точки и расстояния между ними.

Ясное понимание им этого обстоятельства выявляет как мудрость Ньютона, так и слабую сторону его теории. Логическое построение его теории было бы безусловно более удовлетворительным без этого призрачного понятия; тогда в законах фигурировали бы только такие объекты (материальные точки, расстояния), отношение которых к опытному восприятию вполне ясно.

2. Введение мгновенно действующих на расстоянии сил для представления гравитационных эффектов не соответствует характеру большинства явлений, знакомых нам из повседневного опыта. Ньютон предупреждает эти возражения, указывая, что на его закон следует смотреть не как на окончательное объяснение, а как на выведенное из опыта правило.

3. Учение Ньютона не давало никакого объяснения тому, в высшей степени замечательному факту, что вес и инерция тела определяются одной и той же величиной (массой). Достопримечательность этого факта также не ускользнула от Ньютона.

Ни один из этих трех пунктов не возвышается до ранга логического возражения против теории. Они лишь в известной степени выражают неутоленное желание научного духа, борющегося за всеохватывающее проникновение в явления природы и их объяснение с единой точки зрения.

Первый удар по учению Ньютона о движении как программе для всей теоретической физики нанесла максвелловская теория электричества. Оказалось, что обусловленное электрическими и магнитными зарядами взаимодействие между телами является следствием не действующих между ними мгновенных сил дальнего действия, а процессов, распространяющихся в пространстве с конечной скоростью. Согласно концепции Фарадея, наряду с материальной точкой и ее движением появилась нового рода физическая реальность, а именно «поле». Исходя из механических представлений, сначала пытались рассматривать поле как некоторое механическое состояние (движения или напряжения) гипотетической среды (эфира), заполняющей пространство. Но поскольку, несмотря на настойчивые попытки, такая механическая трактовка не увенчалась успехом, постепенно привыкли рассматривать «электромагнитное поле» как последний, не сводимый ни к чему другому, структурный элемент физической реальности. Генриху Герцу мы обязаны сознательным очищением понятия поля от всего побочного, внесенного механическими представлениями, а Г. А. Лоренцу — отделением понятия поля от его материального носителя. По мнению последнего, носителем поля является только физически пустое пространство (или эфир), которому уже механика Ньютона приписывала определенные физические функции. Когда эта эволюция завершилась, никто уже не верил в непосредственное мгновенное действие на расстоянии даже в области тяготения, хотя из-за отсутствия достаточного количества фактов теория поля тяготения не была еще однозначно разработана.

После того как отказались от гипотезы Ньютона о силах дальнего действия, развитие теории электромагнитного поля привело к попыткам объяснения законов движения Ньютона с электромагнитной точки зрения или их замены более точными, основанными на теории поля. Хотя эти попытки не завершились полным успехом, тем не менее основные понятия механики перестали быть фундаментом для физической картины мира.

Теория Максвелла — Лоренца неизбежно вела к специальной теории относительности, которая, разрушив понятие об абсолютной одновременности, исключила возможность существования сил дальнего действия. По этой теории, масса не является неизменной величиной, а зависит от количества энергии и даже равна ей. Она показала также, что закон движения Ньютона надо рассматривать только как предельный, годный для малых скоростей; на его место она поставила новый закон движения, где скорость света в пустоте выступает в качестве предельной скорости.

Последним шагом в осуществлении программы теории поля является общая теория относительности. Количественно она мало меняет теорию Ньютона, но зато она ввела глубокие качественные изменения. Инерция, гравитация и метрическое поведение тел и часов сводится к единому свойству поля, а само поле представлено зависящим от тел (это обобщение закона тяготения Ньютона или соответствующего ему закона поля в формулировке Пуассона). Пространство и время были лишены, таким образом, не своей реальности, а своей каузальной абсолютности (влияющее, но не поддающееся влиянию), которую вынужден был им приписывать Ньютон для того, чтобы получить возможность выразить известные тогда законы. Обобщенный закон инерции перенял роль закона движения. Из этой краткой характеристики становится уже ясным, как элементы теории Ньютона перешли в общую теорию относительности, благодаря чему были преодолены указанные выше три недостатка. По-видимому, в рамках общей теории относительности закон движения можно вывести из закона поля, соответствующего ньютоновскому закону сил. Только после достижения этой цели можно будет говорить о чистой теории поля.

Механика Ньютона подготовила путь для теории поля и в другом, более формальном смысле. Использование в механике Ньютона непрерывно распределенных масс с необходимостью приводило к открытию и применению дифференциальных уравнений в частных производных, которые, в свою очередь, дали язык, необходимый для выражения законов теории поля. В этом формальном отношении ньютоновская концепция дифференциального закона представляет собой первый решительный шаг дальнейшего развития.

Все развитие наших представлений о явлениях природы, о котором шла речь до сих пор, может рассматриваться как органиче-

ское продолжение ньютоновских идей. Но еще в то время, когда разработка теории поля была на полном ходу, опытные факты, касавшиеся теплового излучения, спектров, радиоактивности и т. д., указали границу приложения всей этой системы идей; эта граница еще сегодня, несмотря на гигантские успехи в частности, кажется нам совершенно непреодолимой. Не без серьезных оснований многие физики утверждают, что перед лицом этих фактов оказывается бессильным не только дифференциальный закон, но и закон причинности, бывший до сих пор основным постулатом всего естествознания. Отрицается сама возможность пространственно-временного построения, однозначно соответствующего физическим явлениям. Вряд ли можно вывести из полевой теории, оперирующей дифференциальными уравнениями, непосредственно вытекающую из опыта дискретность значений энергии (или дискретность стационарных состояний) механической системы. Метод де Бройля — Шредингера, имеющий в известном смысле характер теории поля, на основе дифференциальных уравнений и соображений о своеобразном резонансе выводит, правда, существование одних лишь дискретных состояний в поразительном соответствии с данными опыта; но применяющие этот метод вынуждены отказываться от локализации материальных частиц и строго каузальных законов. Но кто осмелится сегодня разрешить вопрос о том, нужно ли окончательно отказаться от дифференциального и каузального законов, этих последних предпосылок ньютоновской концепции природы?

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ АТОМИСТИКА

Открытие принципа сохранения энергии дало важный толчок развитию современного учения о тепле в целом и молекулярно-кинетической теории, в частности. Рассмотрим вначале, каково отношение этого принципа к физическому познанию. Чтобы нам не мешали ни разнообразие предмета, ни привычки или убеждения, рассмотрим вопрос с помощью простейшего сравнения.

Передо мной стоят два частично заполненных водой сосуда G_1 и G_2 . Сосуды соединены гибким шлангом, через который вода из нижних слоев одного сосуда может переливаться в другой; переливание будет происходить до тех пор, пока уровни воды в обоих сосудах сравняются. Сосуд G_1 имеет прозрачные стенки, так что уровень воды в нем можно определить снаружи; он устанавливается на определенной высоте. Стенки второго сосуда непрозрачны, и определить уровень воды в нем непосредственно вообще невозможно. Пусть второй сосуд может быть установлен вертикально, а его вес вместе с содержимым можно определить при любой высоте воды в нем. Как только устанавливается равновесие, наблюдатель определяет для каждого положения G_2 уровень воды h в G_1 относительно стенок этого сосуда и соответствующий вес g сосуда G_2 ; при этом он ограничивается только теми случаями, когда в обоих сосудах имеется вода. Если сосуд G_1 имеет цилиндрическую форму, то наблюдатель найдет простое соотношение: при соответствующем выборе коэффициента a , выражение $ah + g$ не зависит от высоты, на которой установлен G_2 .

Если наблюдателю знакомы законы гидростатики и он знает, что в сосудах находится жидкость, эти исследования покажутся ему неинтересными. Но наш наблюдатель ничего не знал о содержании сосудов; для него данные об изученной им физической системе будут научным открытием. Он скажет: «Уровень воды h в G_1 и вес g сосуда G_2 являются эквивалентными величинами,

потому что определенное изменение уровня h в G_1 всегда вызывает вполне определенное изменение g ; величина $ah + g$ измеряет некоторое свойственное системе неизменное количество».

Именно многократные повторения подобного рода опытов привели физиков к принципу сохранения энергии. В области механики (без учета трения) впервые было найдено, что существуют две величины, одна — Φ , зависящая только от положения материальной точки (потенциальная энергия), а вторая — L , зависящая только от скорости материальной точки (кинетическая энергия), сумма которых $\Phi + L$ не меняется со временем при всех движениях, происходящих без внешнего воздействия на систему. Эту сумму принято называть *механической энергией* системы.

Этот закон сохранения перестает быть верным, как только в замкнутой механической системе начинает играть роль трение. К середине XIX в. физики узнали, что и в этом случае можно установить закон сохранения, но только если учитывать наряду с механическими величинами и термические (эквивалентность механической и тепловой энергии). Закон сохранения справедлив и в тех случаях, когда система претерпевает, кроме механических и тепловых изменений состояния, еще любые другие (например, электрические или химические). В этом случае величина, которая в изолированной системе остается постоянной, т. е. *энергия*, зависит и от параметров, характеризующих термические, электрические, химические и тому подобные свойства системы.

Этот закон энергетического баланса имеет неопценное значение для физики не только потому, что указывает на многие закономерности и позволяет с единой точки зрения рассматривать различные изменения, при которых состояния системы всегда сравниваются по величине энергии. Закон сохранения дал толчок к такому пониманию энергии, при котором любой ее форме приписывается одна и та же физическая природа, совершенно независимо от того, с какими наблюдаемыми величинами она связана в различных частных случаях.

Упомянутый выше несведущий наблюдатель, экспериментирующий с сосудами G_1 и G_2 , мог в малом испытывать то же самое, что и физики, исследующие определенный вопрос. Установив, что $ah + g$ остается постоянным, он затем приписывает сосуду G_1 определенное количество ah , а сосуду G_2 — количество g ; он удовлетворит данным опыта, если представит себе, что при определенном процессе часть содержания G_1 изменяет в соответствующей мере содержание G_2 . Но он может идти и дальше, высказав гипотезу, что содержание G_1 и G_2 одинакового качества, т. е., что процесс опускания уровня в G_2 является не *превращением*, а только *изменением положения* содержимого сосудов. Ясно, что такое предположение приведет его к дальнейшим выводам и изысканиям, к которым первоначальное предположение не привело бы.

То же самое происходит в большом и с физиками. Им предлагается интерпретировать закон энергетического баланса так, будто существует только одного вида энергии, как бы различные ни были внешние формы ее проявления. Такая трактовка позволяет вывести закон сохранения энергии из наиболее общих основ теории, что исключалось бы, если допустить существование принципиально различных видов энергии.

Современные физики тоже считают сведение всех видов энергии к одному-единственному значительным прогрессом, но они не надеются достичь этой цели в ближайшем будущем. В середине прошлого века сомневались меньше. Во всем предыдущем развитии физики механика играла настолько предпочтительную роль, что для физиков того времени предположение об единстве энергии было неразрывно связано с предположением, что эта единая энергия является *механической*. В предисловии к своей основополагающей работе «О сохранении силы» (1847) Г. Гельмгольц высказал эту уверенность следующими словами: «Задача физической науки заключается в приведении всех явлений природы к неизменным силам притяжения и отталкивания, значение которых зависит от расстояния. Если эта цель будет достигнута, то это явится условием для полного постижения тайн природы».

Сегодня мы можем сказать наверняка, что это убеждение, которое еще несколько десятков лет тому назад было господствующим, в полном объеме не оправдалось. Но вместе с тем сегодня меньше, чем раньше отвергается тот факт, что большая часть физических явлений может быть сведена вполне удовлетворительно к механическим процессам. Убеждением в фундаментальном значении механики для теоретической физики мы в первую очередь обязаны кинетической теории тепла, к краткому изложению которой я сейчас и перехожу. При этом я не буду придерживаться исторического хода развития, который в значительной степени был обусловлен последовательностью преодоления известных математических трудностей.

Кинетическая теория материи вначале заимствовала из химии и кристаллографии молекулярную теорию. По этой теории все физические тела состоят из определенных частиц конечной величины (молекул), которые могут двигаться только как целое и в основном обладают свойствами, подобными твердым телам. Каждая такая молекула состоит из атомов, причем, как правило, немногих. Читатель-скептик может подумать, что молекулярная теория просто распространяет те качества, с которыми мы познакомились при изучении тел макромра, на молекулы, и не даст ничего нового. Очень важно показать, что это не верно. Очевидно, теория отражает научную ценность только в том случае, если лежащие в ее основе предположения проще, т. е. менее разнообразны, чем сравнимые с опытом следствия.

Кроме молекулярной теории, кинетика пользуется еще допущением, что законы механики применимы к молекулам и атомам без всяких изменений, причем атомы принимаются за материальные точки. Последнее означает, что положение атома вполне определяется заданием единственной точки, т. е. нельзя говорить о какой-то ориентации или вращении атома.

Представим себе произвольную *изолированную* физическую систему тел, т. е. такую, которая не входит ни в какое взаимодействие с телами других систем. По теории, эта система состоит из очень большого числа движущихся по законам механики атомов, которые действуют друг на друга с силами, зависящими только от их положения. Если некоторое время следить за одним атомом, то мы заметим, что вследствие взаимодействия с другими атомами его скорость c и кинетическая энергия $\frac{mc^2}{2}$ (m — масса атома) принимают различные значения. Но если следовать за атомом достаточно долго, то из всех значений, которые принимает кинетическая энергия в разные моменты времени, можно выделить некоторое среднее значение; обозначим его L . Анализ дает совершенно общий закон, что это среднее во времени значение L переменных величин $\frac{mc^2}{2}$ одинаково для всех атомов системы.

Молекулу можно себе представить состоящей из движущихся друг относительно друга атомов, расстояния между которыми не могут увеличиваться дальше определенных границ из-за действующих на атомы сил. Центр тяжести молекулы в любой момент времени обладает определенной скоростью C , определяемой скоростями ее атомов; C удачно называют скоростью поступательного движения молекулы. Если M — масса молекулы, то $\frac{MC^2}{2}$ можно принять за кинетическую энергию поступательного движения молекулы. Анализ показывает, что среднее во времени значение последней тоже равняется L , т. е. оно одинаково для всех молекул системы и равно среднему значению кинетической энергии отдельного атома.

Следовательно, величина L является общей мерой интенсивности молекулярного движения в системе. Если две изолированные системы с одинаковым L объединить в одну общую систему без сообщения работы или тепла (соприкосновение), то для общей системы характеристическая величина L будет той же, что и у исходных систем; при соприкосновении обмен энергией не происходит. Но если до соприкосновения исходные системы обладали разными L , то после соприкосновения должно происходить их выравнивание путем перехода энергии от системы с большим L к системе с меньшим L . Благодаря этому свойству величина L может быть рассмотрена непосредственно как мера температуры. Мы

действительно вскоре увидим, что L с точностью до числового множителя равняется так называемой абсолютной температуре.

Обратимся теперь к кинетической теории газов. Из опыта известно, что твердые и жидкие тела оказывают заметное сопротивление изменению своего объема. Отсюда заключаем, что в твердом и жидком состояниях вещества близкие молекулы должны действовать друг на друга со значительной силой. Но в газах и парах даже близкие молекулы сильно отдалены друг от друга. Поэтому для этого состояния напрашивается вывод, что молекулы движутся свободно и взаимодействуют только при очень сильном сближении (соударении). Эти свободно движущиеся молекулы ударяются и об стенки сосуда, в котором заключен газ, оказывая на них благодаря этому давление p . Давление p можно легко вычислить из чисто механических соображений, если известны объем сосуда V , интенсивность молекулярного движения L и число молекул n в сосуде. Тогда

$$p = \frac{2}{3} n \frac{L}{V}.$$

В этой формуле содержатся два следствия, соответствующих опыту, а именно:

1. Давление газа при постоянной температуре (L постоянно) обратно пропорционально объему.
2. Давление зависит только от числа, а не от природы молекул, образующих газ.

Последнее из высказанных положений можно проверить экспериментально, поскольку соотношение чисел n для молекул, содержащихся в разных газах, можно установить методами химии.

Наконец, этот результат дает и заключение о взаимной связи, существующей между величиной L и температурой. В учении о теплоте абсолютная температура T определяется проще всего как величина, пропорциональная давлению газа при постоянном объеме. Наше уравнение показывает, что такое определение годится и для величины L ; при этом L равняется абсолютной температуре с точностью до постоянной. Эта постоянная связана, как мы сейчас покажем, с абсолютной величиной молекулы. Применим наше уравнение к одной граммолекуле химически простого газа, т. е. к такому количеству вещества, в котором число граммов равняется молекулярному весу (например, 2 г водорода). Число N молекул в граммолекуле для всех веществ одинаково. Эта универсальная постоянная определяет абсолютную величину молекулы. Для одной граммолекулы наше уравнение запишется в виде

$$p = \frac{2}{3} \frac{NL}{V}.$$

С другой стороны, для одной граммолекулы опыт дает соотношение

$$p = \frac{RT}{V},$$

где R — определенная экспериментально постоянная ($8,3 \cdot 10^7$). Сравнение обоих уравнений дает

$$L = \frac{3}{2} \frac{R}{N} T.$$

Таким образом, связь между L и T установлена.

Из нашего уравнения можно сделать еще один важный вывод относительно давления газа. По определению, L равняется средней кинетической энергии атома, а следовательно, и одноатомной молекулы. Величина $NL = \frac{3}{2} RT$ равна, таким образом, общей кинетической энергии одной граммолекулы одноатомного газа, а значит, вообще всей энергии газа, зависящей от температуры, т. е. от интенсивности молекулярного движения. Удельная теплота одноатомного газа, отнесенная к одной граммолекуле, должна равняться $\frac{3}{2} R$. Этот вывод подтверждается для всех газов, которые по химическим соображениям следует считать одноатомными.

До сих пор не было необходимости делать какие-либо предположения относительно природы газа. Соотвествование полученных результатов данным опыта нужно рассматривать как важное подтверждение общих основ теории. Но изложенное выше не может дать полного удовлетворения по следующим причинам. В основе теории лежит допущение, что частицы (атомы или молекулы), движением которых объясняется теплота, имеют хоть и весьма ограниченную, но вполне определенную конечную величину. С другой стороны, сравнение с опытом полученных до сих пор теоретических результатов не позволяет определить истинные массы атомов и молекул. Решить эту задачу удалось только в теории Клаузиуса, который кинетически объяснил три внешне совершенно различных явления: внутреннее трение, теплопроводность и диффузию. Переходим к обсуждению этой теории.

Если достаточно медленно пропускать газ (или даже жидкость) вдоль трубы, то скорость течения по оси трубы наибольшая, к стенкам она постепенно уменьшается, а непосредственно у стенок исчезает. Внутренние слои скользят относительно внешних, и опыт показывает, что для сохранения прямолинейности связанного со скольжением движения необходима постоянная затрата работы. Для заданного движения величина этой работы зависит от природы вещества и его физического состояния, поэтому физики ввели зависящую от физического состояния характеристическую постоянную (коэффициент внутреннего трения), которая определяет силу взаимодействия между скользящими слоями газа.

Кинетическая теория объясняет происхождение внутреннего трения следующим образом. Если бы мы могли наблюдать движение отдельной молекулы в трубе, мы увидели бы картину, аналогичную движению комара в комарином рое. Наряду с движением отдельного комара заметно еще движение роя в целом. Наблюдатель, не воспринимающий движения отдельного комара, может заметить только движение роя в целом. Если в поле зрения попадает одновременно большое число произвольно выбранных комаров, то несмотря на различие скорости и направления движения отдельных комаров, в среднем они будут двигаться в том же направлении, что и рой в целом.

Бросим теперь взгляд на среднюю часть трубы, где скорость движения роя в направлении оси наибольшая. Вследствие молекулярного движения эта средняя часть непрерывно обменивается молекулами с внешними частями. Но поскольку вошедшие вновь молекулы идут из слоев, где скорость меньше, они обладают в направлении оси движением более медленным, чем соответствующая средняя часть. Поэтому скорость движения роя в среднем слое уменьшается, если только не позаботиться о сохранении постоянства его движения, или, вернее, не возобновлять его постоянно внешним воздействием, например созданием разности давлений на концах трубы. Понятно, что для сохранения постоянства движения необходимо затратить определенную работу и энергию.

При математическом исследовании явления большую роль играет понятие «средняя длина свободного пробега», которое не входило в предыдущие рассуждения. Оказывается, что энергия, необходимая для сохранения постоянства заданного течения, при прочих равных условиях тем больше, чем больше средний путь, пробегаемый молекулой между двумя столкновениями (средняя длина свободного пробега). Теория позволяет вычислить среднюю длину свободного пробега по данным наблюдения внутреннего трения; для воздуха при атмосферном давлении она равна примерно 0,0001 мм. С увеличением давления она соответственно уменьшается.

В полном согласии с опытом теория дает тот удивительный результат, что при заданном движении ежесекундная трата работы на поддержание его постоянства не зависит от давления.

В толще газа температура, т. е. интенсивность теплового движения, меняется с высотой. Вверху она наибольшая, внизу она постепенно падает. Тогда тепловая энергия переходит от верхней части газа к нижней; это явление называется «теплопроводностью». С точки зрения кинетической теории, она объясняется следующим образом. Через горизонтальную плоскость, мысленно расположенную на определенной высоте в газе, непрерывно сверху вниз и снизу вверх перелетают молекулы. Но идущие сверху молекулы приходят из более возбужденных слоев, чем идущие снизу. Поэтому первые, в среднем, переносят через плоскость

большую тепловую энергию, чем последние. Разница и представляет собой прошедшую через плоскость теплоту.

Если в верхнюю часть сосуда ввести водород, а в нижнюю азот, то произойдет медленное перемешивание (диффузия) обоих газов, если даже любые движения газа тщательно устранены. С точки зрения молекулярной теории, это явление объясняется совершенно так же, как и теплопроводность. Вследствие теплового движения через заданную плоскость в обе стороны проникают молекулы обоих газов; но преобладает течение молекул с той стороны, где плотность рассматриваемых молекул больше.

Между коэффициентами внутреннего трения, теплопроводности и диффузии теория устанавливает определенное соотношение, которое можно проверить экспериментально, по крайней мере приблизительно. Это замечательный результат кинетической теории тепла.

Как уже указывалось, из коэффициента внутреннего трения (или теплопроводности, или диффузии) можно получить длину свободного пробега молекулы. Ломмидт использовал этот факт для первого (приблизительного) определения истинной величины молекулы. Он рассуждал так. Длина свободного пробега определяется числом n молекул в единице объема с наименьшим расстоянием d между центрами молекул при столкновении. Простые соображения позволяют определить произведение nd^2 по свободному пробегу. С другой стороны, ясно, что n молекул, расположенных в единице объема на наиболее близком возможном расстоянии d друг от друга, занимают объем приблизительно nd^3 . Если считать, что этот случай осуществляется в жидком состоянии (об этом говорит незначительная зависимость объема жидкости от температуры), то nd^3 будет приблизительно равняться тому объему вещества в жидком состоянии, который занимает единица объема газа при тех условиях, при которых определялась длина свободного пробега. Если известны nd^2 и nd^3 , то можно узнать n и d в отдельности, а также число N молекул в граммолекуле; между N и n существует простое соотношение. Оказалось, что диаметр маленькой молекулы составляет несколько десятков миллионных миллиметра, а N лежит между 10^{23} и 10^{24} . Позже для определения числа N были созданы более точные методы, которые дали результаты, отличающиеся от $6,8 \cdot 10^{23}$ не больше, чем на 5%.

В кинетической теории газов в большинстве расчетов предполагается, что средняя длина свободного пробега мала по сравнению с размерами сосуда. Но часто случается, что такое предположение не приемлемо. Если давление достигает одной десятичной атмосферы (около 0,1 мм ртутного столба), то длина свободного пробега возрастает до 1 мм. В таких случаях уже не имеют места закономерности, установленные для свободных пробегов, малых по сравнению с размерами сосудов. Оказывается, например, что течение газов по трубам происходит так, будто непосредственно

прилегающие к стенкам трубы слои газов скользят относительно стенок со скоростью, которую можно определить теоретически. Особенно просты и интересны закономерности в случае, когда длина свободного пробега молекулы велика по сравнению с размерами сосудов, например трубы. Тогда действуют совершенно другие законы, чем раньше. Так, например, Кнудсен теоретически нашел и экспериментально установил следующее. Пусть сосуд состоит из двух пустотелых стеклянных шаров, соединенных трубкой, диаметр которой мал по сравнению с длиной свободного пробега. Если нагреть шары неодинаково, так чтобы вдоль трубки существовал перепад температур, то в более нагретом сосуде давление будет больше, чем в более холодном. В этом случае законы гидростатики не наблюдаются.

Методы и результаты кинетической теории газов оказались плодотворными и вне этой теории. Ван-дер-Ваальс ввел в теорию газов дополнение, учитывающее собственный объем молекул и силы взаимодействия между ними; он создал теорию, которая охватывает, по крайней мере качественно, и жидкое состояние. Рикке и Друде создали теорию, которая объяснила приблизительное постоянство отношения электро- и теплопроводности металлов. В основе этой теории лежит предположение, что в металлах в тепловом движении участвуют свободные элементарные электрические заряды. Теория магнетизма также обязана кинетической теории тепла своим, несколько неожиданным подъемом. Обо всем этом здесь лишь упоминается. Глубже следует рассматривать две очень важные темы, а именно раскрытие Больцманом общей сущности необратимых процессов и недавно достигнутое понимание того, что молекулярная кинетика соответствует опыту только внутри определенных границ. Эти исключительно важные темы вводят нас в круг вопросов, занимающих физиков-теоретиков в настоящее время.

Согласно молекулярно-кинетической теории, законы учения о теплоте не являются точными; они являются усредненными законами, от которых всегда должны происходить отклонения. Например, отскакивающие от каждой единицы поверхности стенки молекулы газа оказывают на нее определенное среднее давление. Но действительно оказываемое моментальное давление не равно в точности среднему. Величина давления испытывает колебания, соответствующие хаотичному характеру молекулярных движений, обуславливающих давление. Здесь встает важный вопрос: «Можно ли действительно наблюдать беспорядочные колебания, вызванные хаотичностью молекулярного движения, или благодаря своей малости они ускользают от наблюдения?» Ответ опешмляет: теория действительно предсказывает возможность наблюдения таких колебаний, причем они наблюдались еще почти сто лет тому назад.

Как указано выше, по теории, каждая молекула движется с такой скоростью, что ее средняя кинетическая энергия L равна

$\frac{3}{2} N T$. Полученный результат, как это следует из его вывода, справедлив не только для молекул, но и для произвольно больших комплексов, движущихся, как целое. Отсюда сразу вытекает, что скорость движения тем меньше, чем больше масса рассматриваемого образования. Частицы с радиусом в одну тысячную миллиметра легко наблюдаются в микроскоп. Их масса порядка 10^{-12} г. Вышеприведенное соотношение дает для средней скорости молекулярного движения при обычной температуре $0,2$ мм/сек, т. е. огромную для микроскопических наблюдений величину. Но она в явлениях непосредственно не сказывается. Частица окружена средой, например жидкостью. Из-за трения об жидкость движение быстро прекратилось бы, но благодаря хаотичности движения молекул среды частица получает все новые импульсы. Результатом обоих воздействий является в высшей степени беспорядочное движение, скорость и направление которого крайне быстро меняются, причем тем быстрее, чем вязче окружающая частицу среда. Частица указанной выше величины в воде описывает в одну секунду путь около одной тысячной миллиметра. Маленькие плавающие в жидкости частицы под влиянием хаотического движения молекул среды совершают, следовательно, видимое в микроскоп беспорядочное движение; оно было действительно обнаружено уже почти сто лет назад («броуновское движение»).

Броуновское движение имеет большое значение, во-первых, потому, что позволило совершенно точно вычислить число N , а следовательно, и абсолютную величину молекулы. Число N определяет среднюю кинетическую энергию $L = \frac{3}{2} \frac{R}{N} T$ поступательного движения, а по этой энергии можно вычислить среднее значение пути, пройденного частицей в одну секунду. Но большое принципиальное значение броуновского движения заключается в том, что в нем, как мы уже заметили, непосредственно наблюдаются беспорядочные элементарные процессы, которые, согласно кинетической теории, обусловлены тепловым состоянием материи. В какой-то мере можно говорить, что под микроскопом часть тепловой энергии непосредственно видна в форме механической энергии движущихся частиц.

Это явление показывает, что законы феноменологического учения о тепле имеют лишь ограниченную достоверность. По этой теории, частица, обладающая первоначально поступательным движением, из-за трения о жидкость должна быстро остановиться, а затем оставаться в покое.

Обобщение теории броуновского движения позволяет объяснить величину вызванных хаотичностью молекулярных движений отклонений состояния произвольных физических систем от состояний равновесия, предписанных системам феноменологической теорией тепла.

Эти рассуждения приводят нас к вопросу, занимавшему теоретиков еще со времен установления молекулярной теории, но решенному лишь в 70-х годах Больцманом. Механические процессы, к которым кинетическая теория тепла пытается сводить тепловые, являются обратимыми. Это означает, что для любого возможного движения существует другое, при котором материальная точка пробегает те же положения с точно той же скоростью, но в обратной последовательности. В противоположность этому, обращения тепловых процессов никогда не наблюдались. Если, например, привести в соприкосновение два по-разному нагретых куска металла, то их температуры уравниваются. Если же привести в соприкосновение два одинаково нагретых куска металла, то сами по себе они никогда не приобретут разные температуры. Казалось бы, что отсюда надо сделать заключение о принципиальной невозможности сведения тепловых явлений к механическим, ибо представляется невозможным свести необратимые процессы к обратимым.

Мы рассмотрим решение Больцманом¹ этого противоречия на приведенном выше частном примере взвешенных частиц. Представим себе настолько большую взвешенную частицу, что ее броуновское движение уже незаметно мало. Какова наибольшая скорость, которую может приобрести такая частица вследствие хаотичности молекулярного движения? Теория дает здесь такой ответ: несмотря на то, что в среднем броуновское движение очень мало, для скорости этого движения не существует верхней границы; больше того, должны попадаться любые большие скорости. Но чем больше скорость, тем реже она встречается. Поэтому частота появления определенной скорости быстро убывает с ее величиной. Эту частоту появления определенной скорости мы называем ее *вероятностью*.

Если извне сообщить частицам значительную скорость s , то этим они приводятся в состояние с очень малой вероятностью. Как изменится эта скорость за короткое время t , если частицы предоставлены самим себе? По кинетической теории, этот мысленный эксперимент, который мы считаем часто происходящим, не всегда дает одинаковые результаты. В части опытов скорость частиц за время t возрастает (первый случай), в остальных по истечении времени t скорость s оказывается меньше (второй случай). Но совершенно ясно, что второй случай встречается неизмеримо чаще первого, так как, по ранее сказанному, среди предоставленных самим себе частицам маленькие скорости встречаются вообще намного чаще (они вероятнее) больших. Если частица достаточно велика, то эти частоты настолько разнятся, что наблюдение первого случая практически исключено. Таким образом, Больцман разрешил обсуждаемое противоречие, показав, что, согласно кинетической теории, для термодинамически необратимого процесса,

¹ Это рассуждение обширно и тонко. Но важность и красота предмета щедро окупят напряжение мысли.



Альберт Эйнштейн

вообще говоря, возможен и обратный процесс, но вероятность того, что последний действительно произойдет, практически исчезающе мала. Таким образом, по Больцману, за средними опытными законами скрывается сущность необратимых тепловых явлений.

Обобщая, мы можем высказать следующее утверждение: изменение состояния изолированной системы происходит так, что (в среднем) более вероятные состояния следуют за менее вероятными. Ясно, что в термодинамике вероятность состояния имеет фундаментальное значение. Больцман сумел показать, что определенная термодинамически энтропия S состояния связана с вероятностью W этого состояния уравнением

$$S = \frac{R}{N} \lg W,$$

где R и N — прежние постоянные, а $\lg W$ — натуральный логарифм вероятности состояния.

Это уравнение связывает термодинамику с молекулярной теорией. Оно дает статистические вероятности состояний даже таких систем, для которых мы не в состоянии строить молекулярно-ки-

нетическую модель. Таким образом, великодушная идея Больцмана имеет большое значение для теоретической физики не только потому, что разрешила кажущееся противоречие теории, а в первую очередь потому, что дала эвристический принцип, значение которого выходит далеко за пределы области действия молекулярной механики.

Из до сих пор сказанного вытекает, что кинетическая теория тепла обладает значительной долей правды. Но уже несколько лет известно, что молекулярная механика имеет определенные границы применимости. Больше того, положения, лежащие в ее основе, никогда не выполняются точно и верны только с известным приближением. Рассмотрим кратко этот вопрос.

С точки зрения кинетической теории тепла, мы представляли себе химически простое твердое тело как систему очень большого числа атомов, смещающихся друг относительно друга, причем каждое такое смещение встречает заметное сопротивление, возрастающее с увеличением смещения.

Будем следить за отдельным атомом достаточно долго для того, чтобы выяснить характер совершаемого им движения. Простоты ради будем считать, что все молекулы, кроме рассматриваемой, находятся в состоянии равновесия. Тогда они будут препятствовать изменению положения движущегося атома. Эта сила сопротивления будет тем больше, чем сильнее атом отклоняется от своего состояния равновесия. Предоставленный самому себе атом будет колебаться вокруг своего положения равновесия подобно маятнику. Механическая энергия колеблющегося таким образом тела состоит из кинетической и потенциальной энергии, причем при гармоническом колебательном движении (при котором время одного колебания не зависит от амплитуды), потенциальная энергия в среднем равна кинетической. Последняя, как это следует из вышеуказанных законов, равна L или $\frac{3}{2} \frac{R}{N} T$, так что полная

механическая энергия атома в среднем равна $\frac{3RT}{N}$, а для граммолекулы она должна равняться $3RT$. Эти рассуждения, конечно, обладают тем недостатком, что наша аргументация основывалась на допущении, что движения отдельных атомов не влияют друг на друга. Но это предположение не может внести в результат заметных искажений. Если энергию $3RT$ принять прямо за количество тепла граммолекулы, то удельная теплоемкость на 1 граммолекулу должна равняться $3R$, или 5,97 гкал. Это действительно соответствует эмпирическому закону Дюлонга и Пти, который вполне удовлетворительно выполняется при обычных температурах.

Но при низких температурах, вопреки результатам молекулярной механики, значение удельной теплоемкости меньше. Вблизи абсолютного нуля она даже становится исчезающе малой. Этот результат не привел теоретиков в изумление, так как они знали, что и законы излучения нагретых тел не согласуются с молекуляр-

ной механикой, а между законами теплового излучения и удельной теплоемкости должна существовать тесная связь. Этот результат новейших исследований доказывает, что чем быстрее колебания и ниже температура, тем хуже выполняются законы молекулярно-кинетической теории. Современные физики считают бесспорным, что законы механики не годятся для быстрых колебательных движений малых масс. Несмотря на все усилия до сих пор не удалось так изменить основы механики, чтобы они охватывали и эти явления. Проведенные до сих пор исследования связаны с теорией излучения Планка. Они не привели к полному теоретическому пониманию, хотя и дали полезные формулы.

ПРЕДИСЛОВИЕ К «ОПТИКЕ» НЬЮТОНА

Счастливый Ньютон, счастливое детство науки! Тот, кто располагает временем и покоем, сможет, прочитав эту книгу, пережить те замечательные события, которые великий Ньютон испытал в дни своей молодости. Природа для него была открытой книгой, которую он читал без усилий. Концепции, которыми он пользовался для упорядочения данных опыта, кажутся вытекающими спонтанно из самого опыта, из замечательных экспериментов, заботливо описываемых им со множеством деталей и расставленных по порядку, подобно игрушкам. В одном лице он сочетал экспериментатора, теоретика, мастера и — не меньше — художника в изложении. Он предстал перед нами сильным, уверенным и одиноким; его радость созидания и ювелирная точность проявляются в каждом слове и в каждом рисунке.

Отражение, преломление, образование изображений в линзах, характер работы глаза, спектральное разложение и воссоединение различных видов света, изобретение телескопа — рефлектора, первые основы теории цветов, элементарная теория радуги вереницей проходят перед нами. В конце изложены его наблюдения над цветами тонких пленок как исходной точки для последующего теоретического прогресса, ждавшего более ста лет прихода Томаса Юнга.

Эпоха Ньютона давно уже прошла проверку временем, борьба сомнений и мучения его поколения исчезли из нашего поля зрения; работы немногих великих мыслителей и художников остались, чтобы радовать и облагораживать нас и тех, кто придет за нами. Открытия Ньютона вошли в сокровищницу признанных достижений познания. Это новое издание его труда по оптике, тем не менее, должно быть принято с теплой благодарностью, потому что только сама эта книга дает нам возможность взглянуть на деятельность этого единственного в своем роде человека.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ, ТЕРМОДИНАМИКА И КОСМОЛОГИЯ

Книга Толмена представляет собой правильное, обстоятельное и ясное изложение всего содержания специальной и общей теории относительности. При этом автор с острым, критическим чувством ограничился феноменологическим изложением, опустив многочисленные попытки объяснить с помощью методов теории относительности связь гравитации с электромагнитным полем и строение материи. Это кажется вполне оправданным, потому что ни одна из этих попыток, отличающихся друг от друга коренным образом, не привела до сих пор к убедительным результатам. Не учтены в книге и попытки релятивистской трактовки квантовой теории; как известно, они пока привели только к частичным результатам. Таким путем автору удалось, по моему мнению, дать систематическое изложение тех методов и результатов теории относительности, которые представляются призванными войти в любую будущую теорию, способную глубже проникнуть в механизм происходящего.

Особенно тщательно рассмотрены те разделы, в методическом построении которых автор сам принял видное участие: релятивистское изложение термодинамики и так называемая космологическая проблема, т. е. изучение структуры пространственно-временного континуума в целом, без учета пространственной неравномерности распределения (астрономического) материи в космосе. В связи с космологической проблемой — одно замечание, относящееся не только к этой книге, но и ко всем новым публикациям по этому вопросу: введение космологической константы в уравнения «поля» казалось необходимым, пока вынуждены были считать, что средняя плотность материи, и соответственно энергии, в мире не зависит от времени. Но с формально-теоретической точки зрения введение такой константы является чистым произволом. С тех пор как стало известно о расширении звездной системы, для введения

этого члена отсутствуют как логические, так и физические доводы. Поэтому при рассмотрении космологической проблемы представляется естественным отказаться от введения Λ -члена до тех пор, пока для этого введения не возникнет опытного основания.

Особенно ценным в книге Толмена я нахожу исчерпывающее изложение предсказанных теорией закономерностей в туманностях, так как именно они в первую очередь кажутся предназначенными для пополнения наших познаний о строении пространственно-временного континуума.

ПРЕДИСЛОВИЕ К КНИГЕ Л. ИНФЕЛЬДА «МИР В СВЕТЕ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ»

Чем более тонкой и специализированной становится наука, тем сильнее чувствуется необходимость постичь ее существенные черты наглядно, так сказать, легко, удобоваримо, без технического аппарата. Но может возникнуть сомнение: что останется от физики, если лишить ее всех математических средств?

Последующее изложение Л. Инфельдом физики материи служит живым ответом современности на этот вопрос. Оно написано самостоятельно мыслящим молодым ученым, который активно и страстно переживает духовную борьбу в этой области. Каждый интеллигентный человек, даже неспециалист, может глубоко вникнуть в современные физические проблемы. Эта драма вызывает у жаждущего понимания читателя не менее напряженное внимание, чем увлекательный роман.

Ученый тоже кое-что получит из такой книги. Он с удовольствием увидит мучащую его проблему в живом отражении, раскрытую просто, без больших осложнений и все-таки вполне ясно. Радостное и вдохновляющее чувство испытываешь, видя проблему изложенной кратко и живо во всем ее разнообразии и во всех ее связях.

ФИЗИКА И РЕАЛЬНОСТЬ

§ 2. Механика и попытки основать на ней всю физику

Важным свойством нашего чувственного опыта и вообще всего нашего опыта является его последовательность во времени. Этого рода последовательность приводит к мысленному представлению о субъективном времени, как некоторой схеме для упорядочения нашего опыта. Как увидим позже, субъективное время приводит затем, через понятия телесного объекта и пространства, к понятию объективного времени.

Все-таки понятию объективного времени предшествует понятие пространства, а последнему — понятие телесного объекта. Последнее непосредственно связано с комплексами чувственных восприятий. Уже показано, что характерное свойство понятия «телесного объекта» состоит в том, что ему можно приписать существование, независимое от времени (субъективного) и от его воспринимаемости нашими чувствами. Мы это делаем, хотя и наблюдаем его изменение во времени. Пуанкаре правильно настаивал на том, что мы различаем двоякого рода изменения телесного объекта: «изменения состояния» и «изменения положения». Последние, говорил он, могут регулироваться произвольным движением нашего тела.

Существование предметов, которым в определенной сфере ощущений нельзя приписывать никаких изменений состояния, а только изменения положения, является фактом фундаментального значения для формирования понятия пространства (в определенной степени даже для обоснования понятия телесного объекта). Мы будем называть такой предмет «практически твердым».

Если в качестве объекта ощущения рассматриваются одновременно, т. е. просто как целое, два практически твердых тела, то для этого ансамбля существуют изменения, которые нельзя считать изменениями положения ансамбля, хотя для каждого из составляющих они являются таковыми. Это ведет к понятию «изме-

нения относительного положения» двух предметов, а также к понятию их «относительного положения». Мы находим, впрочем, что среди относительных положений имеется одно особое рода, которое мы называем «контактом»¹.

Постоянный контакт двух тел в трех или более «точках» означает, что они соединены в сложное квазитвердое тело. Можно говорить, что второе тело образует тогда продолжение (квазитвердое) первого и, в свою очередь, может быть продолжено квазитвердо. Возможность квазитвердого продолжения тела не ограничена. Истинной сущностью мысленного квазитвердого продолжения тела B_0 является определяемое им бесконечное «пространство».

Тот факт, что каждый, любым образом расположенный телесный объект может быть приведен в контакт с квазитвердым продолжением определенным образом выбранного тела B_0 (тела отсчета), является, по-моему, эмпирической основой нашего понятия о пространстве. В донаучном мышлении роль B_0 и его продолжения играла твердая кора Земли. Само название геометрии указывает, что понятие пространства психологически связано с Землей как неподвижным телом.

Смелое понятие «пространства», предшествующее всей научной геометрии, превращает наше мысленное понятие соотношения положений предметов в понятие о положении этих телесных предметов в «пространстве». Это представляет собой большое формальное упрощение. С помощью понятия пространства достигается, между прочим, такая ситуация, когда каждое описание положения рассматривается как описание контакта; утверждение: точка телесного предмета расположена в некоторой точке пространства P означает, что предмет касается точки P тела отсчета типа B_0 (предполагаемого приблизительно продолженным) в рассматриваемой точке.

В греческой геометрии пространство играло только качественную роль, потому что хотя положение тела в пространстве безусловно считалось заданным, но оно не описывалось числами. Декарт первым ввел этот метод. На его языке все содержание евклидовой геометрии могло быть аксиоматически основано на следующих утверждениях: 1) две фиксированные точки твердого тела определяют некоторое расстояние; 2) точкам пространства можно сопоставить тройку чисел x_1, x_2, x_3 таким образом, что для каждого расстояния $P' - P''$, крайние точки которого имеют координаты x_1', x_2', x_3' и x_1'', x_2'', x_3'' , выражение

$$s^2 = (x_1'' - x_1')^2 + (x_2'' - x_2')^2 + (x_3'' - x_3')^2$$

¹ Это в природе вещей, что мы не можем говорить об этих вопросах иначе, чем с помощью созданных нами понятий, которые недоступны определению. Тем не менее существенно, чтобы мы пользовались только понятиями, соответствие которых нашему опыту находится вне сомнений.

не зависит от положения данного тела и положения всех остальных тел.

Это число s (положительное) означает длину отрезка, или расстояние между точками пространства P' и P'' (которые совпадают с точками P' и P'' прямой).

Формулировка намеренно так выбрана, что она ясно выражает не только логическое и аксиоматическое, но и эмпирическое содержание евклидовой геометрии. Правда, чисто логическое (аксиоматическое) представление последней обладает большей простотой и ясностью. Но зато оно вынуждено отказаться от представления связи между идеальным построением и чувственным восприятием, а ведь значение геометрии для физики базируется только на этой связи. Фатальная ошибка, что в основе евклидовой геометрии и связанного с ней понятия пространства лежали потребности мышления, обусловлена тем, что эмпирическая основа, на которую опирается аксиоматическое построение евклидовой геометрии, была предана забвению.

В той мере, в которой можно говорить о существовании в природе твердых тел, евклидова геометрия должна считаться физической наукой, польза которой должна быть показана ее применением к чувственному восприятию. Она касается совокупности законов, которые должны быть действительны для относительных положений твердых тел независимо от времени. Мы видим, что физическое понятие пространства в том виде, в котором оно применялось первоначально в физике, также связано с существованием твердых тел.

С точки зрения физика, существенное значение евклидовой геометрии состоит в том, что ее законы не зависят от специфической природы тел, относительные положения которых она изучает. Ее формальная простота характеризуется свойствами однородности и изотропности (и существованием подобных сущностей).

Понятие пространства, правда, полезно, но не необходимо для собственно геометрии, т. е. для формулировки правил, касающихся относительных положений твердых тел. В противоположность этому понятие объективного времени, без которого невозможно формулировать основные принципы классической механики, связано с понятием пространственного континуума.

Введение объективного времени содержит в себе два независимых друг от друга утверждения:

1. Введение местного объективного времени, связывающего последовательность опытов во времени с указаниями «часов», т. е. с замкнутой системой периодических событий.

2. Введение понятия объективного времени для событий во всем пространстве; только благодаря этому понятию идея местного времени расширяется, становясь идеей о времени в физике.

Замечание, относящееся к 1-му. То обстоятельство, что понятие периодического процесса предшествует понятию времени, ко-

гда занимаются выяснением происхождения и эмпирического содержания понятия времени, не является, на мой взгляд, «логической ошибкой». Такая концепция соответствует в точности приоритету понятия твердого (или квазитвердого) тела при трактовке понятия пространства.

Дополнительное разъяснение ко 2-му. Господствовавшая до появления теории относительности иллюзия, что с точки зрения опыта смысл одновременности пространственно разделенных событий, а следовательно смысл времени в физике, ясен а priori, происходила от того, что в нашем повседневном опыте мы могли пренебрегать временем распространения света. Для такого рассуждения мы привыкли пренебрегать различием между «одновременно увиденным» и «одновременно наступившим», в результате чего стирается разница между временем и местным временем.

Неточность, приписываемая эмпирической точкой зрения понятию времени в классической механике, маскируется аксиоматическим представлением пространства и времени как сущностей, независимых от наших чувств. Такое использование понятий, когда они рассматриваются независимо от эмпирической основы, которой они обязаны своим существованием, не всегда является вредной в науке. Но если думать, что эти понятия, происхождение которых забыто, являются необходимыми и незыблемыми спутниками нашего мышления, то это будет ошибкой, которая может стать серьезной опасностью для прогресса науки.

Было счастливой случайностью для развития механики, а следовательно, и для развития физики вообще, что философы прошлого при эмпирической интерпретации понятия объективного времени не вскрыли отсутствия в нем точности. Полные уверенности в реальной значимости построения пространства — времени, они установили фундамент механики, который мы схематически охарактеризуем так:

(a). Понятие материальной точки: телесный объект, который в отношении своего положения и движения может быть с достаточной точностью описан точкой с координатами x_1, x_2, x_3 . Описание его движения (относительно «пространства» B_0) рассмотрением x_1, x_2, x_3 как функций времени.

(b). Закон инерции: исчезновение компонент ускорения для материальной точки, достаточно удаленной от всех остальных точек.

(c). Закон движения (для материальной точки): сила = масса $\times$ ускорение.

(d). Закон силы (действие и противодействие между материальными точками).

Здесь (b) является не чем иным, как важным частным случаем (c). Истинная теория существует только тогда, когда заданы законы силы. Для того чтобы система точек, взаимосвязанных постоянным образом, могла вести себя как материальная точка, силы

должны подчиняться, в первую очередь, закону равенства действия и противодействия.

Эти фундаментальные законы вместе с законом Ньютона для силы тяготения образуют основу механики небесных тел. В этой механике Ньютона, в противоположность указанным выше понятиям о пространстве, происходящим от твердых тел, пространство B_0 входит под формой, которая содержит новую идею: требования (b) и (c) действительны (при заданном законе силы) не для всего пространства B_0 , а только для некоторого B_0 с близкими условиями движения (инерциальной системы). Вследствие этого координированное пространство приобрело одно независимое физическое свойство, которое не содержалось в понятии чисто геометрического пространства, — обстоятельство, которое представило уму Ньютона обширную тему для размышлений (опыт с ведром)¹.

Классическая механика является лишь общей схемой; она становится теорией только после явного указания закона силы (d), что с таким успехом было сделано Ньютоном для небесной механики. Но чтобы достигнуть наибольшей логической простоты фундамента, этот теоретический метод не удовлетворителен в том смысле, что законы силы не могут быть получены логическими и точными соображениями, потому что априори их выбор в значительной степени произволен. Даже закон силы тяготения Ньютона отличается от других мыслимых законов силы только своей *результативностью*.

Хотя мы сегодня определенно знаем, что классическая механика не достаточна, чтобы служить фундаментом для всей физики, она всегда находится в центре всего мышления в физике. Причина состоит в том, что несмотря на значительный прогресс, достигнутый со времен Ньютона, мы еще не пришли к новому фундаменту физики, который позволил бы нам быть уверенными, что вся совокупность исследованных явлений и частично увенчанных успехом теоретических систем, сможет быть из него логически выведена. Ниже попытаюсь описать, в чем состоит проблема.

Во-первых, мы должны отдавать себе отчет, до какого предела система классической механики проявила себя способной служить основой для всего ансамбля физики. Так как здесь мы занимаемся только основаниями физики и ее развитием, мы оставляем в стороне чисто формальный прогресс механики (уравнение Лагранжа, канонические уравнения и т. д.). Одно замечание кажется нам необходимым. Понятие «материальная точка» является фундаментальным для механики. Если теперь мы желаем получить меха-

¹ Этот недостаток теории мог быть устранен только такой формулировкой механики, которая была бы действительно во всем B_0 . Это был один из шагов, которые привели к общей теории относительности. Другой недостаток, также устраненный введением общей теории относительности, состоял в том, что механика сама по себе не дает основания для равенства тяжелой и инертной масс материальной точки.

нику телесного предмета, который *не может* трактоваться как материальная точка, — а, строго говоря, все «воспринимаемые нашими чувствами» предметы принадлежат к этой категории, — то ставится следующий вопрос: как мы должны представить себе предмет, состоящий из материальных точек, и какие силы нужно предполагать действующими между ними? Если механика претендует на *полное* описание предмета, то этот вопрос необходимо ставить.

Стремление механики считать эти материальные точки и законы сил, действующих между ними, неизменными естественно, ибо изменения во времени находятся вне области механического объяснения. Отсюда видно, что классическая механика должна вести к атомистической структуре материи. И теперь мы устанавливаем с очевидностью как ошибаются теоретики, думающие, что теория индуктивно выводится из опыта. Даже великий Ньютон не смог избежать этой ошибки (*Hypotheses non fingo* — «Гипотез не измышляю»). Чтобы не теряться без использования такого способа мышления (атомистического), наука вначале поступила следующим образом. Механика системы определена, если потенциальная энергия системы задана как функция ее конфигурации. Теперь, если действующие силы таковы, что они обеспечивают сохранение определенных свойств порядка в конфигурации системы, то конфигурация с достаточной точностью может быть описана сравнительно небольшим числом переменных q_i ; потенциальная энергия принимается в расчет только в той мере, в какой она зависит от *этих переменных* (например, описание конфигурации практически твердого тела шестью переменными).

Вторым способом приложения механики, при котором избегается учет деления материи на «реальные» материальные точки, является механика так называемых сплошных сред. Эта механика характеризуется фиктивным допущением, что плотность и скорость материи непрерывным образом зависят от координат и времени и что не заданная явно часть взаимодействия может рассматриваться как сила, действующая на поверхность (сила давления), которая, с другой стороны, является непрерывной функцией положения. Сюда относятся гидродинамика и теория упругости твердых тел. Эти теории избегают явного введения материальных точек и пользуются фикциями, которые в свете основ классической механики могут иметь только приближенное значение.

Эти категории науки имеют большое *практическое* значение; кроме того, они создали, благодаря распространению их идей в мире математики, формальные вспомогательные орудия (уравнения в частных производных), которые необходимы для последующих попыток формулировки всех аспектов физики способом, отличающимся от ньютоновского своей новизной.

Эти два способа приложения механики принадлежат к так называемой «феноменологической» физике. Этот вид физики харак-

теризуется применением, насколько это возможно, весьма близких к опыту понятий; но именно вследствие этого приходится в значительной мере отказываться от единства фундамента. Теплота, электричество, свет описываются специальными функциями состояния и константами вещества, отличными от механических. Определение взаимной зависимости всех этих переменных было делом скорее эмпирическим. Многие современники Максвелла видели в таком представлении конечную цель физики, которая, думали они, может быть достигнута из опыта чисто индуктивным путем, на основе сравнительно тесного контакта используемых понятий и опыта. С точки зрения теории познания близко к этой позиции стояли Ст. Милль и Э. Мах.

По-моему, величайший подвиг механики Ньютона состоит в том, что ее постоянное применение привело к выходу за рамки феноменологических представлений, особенно в области тепловых явлений. Это произошло в кинетической теории газов и, в более общем виде, в статистической механике. Первая объединила уравнение идеальных газов, вязкость, диффузию газов и установила логическую связь между явлениями, которые, с точки зрения прямого опыта, не имели абсолютно ничего общего.

Статистическая механика дала механическую интерпретацию идей и законов термодинамики и открыла предел приложения ее понятий и законов в классической теории теплоты. Кинетическая теория, которая намного обогнала феноменологическую физику в том, что касается логического единства своих основ, кроме того дала для истинных величин атомов и молекул определенные значения, которые получились различными независимыми методами и были, таким образом, установлены в областях, где они не могли подвергаться серьезному сомнению. Эти решающие успехи были достигнуты за счет согласования атомистических сущностей с материальными точками, т. е. сущностей, спекулятивный и конструктивный характер которых очевиден. Никто не может надеяться когда-либо «прямо воспринимать» атом. Законы, касающиеся переменных, непосредственно связанных с экспериментальными данными (например, температуры, давления, скорости), были выведены из основных идей путем сложных расчетов. Таким образом, физика (по крайней мере, часть ее), первоначально построенная феноменологически, была сведена, будучи основана на механике Ньютона для атомов и молекул, на основу, значительно более удаленную от прямого опыта, но зато более единого характера.

§ 3. Концепция поля

В объяснении оптических и электрических явлений механика Ньютона была намного менее удачлива, чем в вышеуказанных областях. Правда, в своей корпускулярной теории света Ньютон пытался сводить свет к движению материальных точек,

Однако позже, когда явления поляризации, дифракции и интерференции предписывали его теории все более искусственные видоизменения, волновая теория Гюйгенса восторжествовала над ней.

Эта теория, очевидно, обязана своим возникновением явлениям кристаллографической оптики и теории звука, уже достаточно развитой к этому моменту. Нужно признать, что теория Гюйгенса также была основана на классической механике. Но все проникающий эфир, который должен был рассматриваться как носитель волн, и его структура, образованная материальными точками, не могли быть объяснены ни одним из известных явлений. Нельзя было дать ясную картину ни внутренних сил, управляющих эфиром, ни сил, действующих между эфиром и «весомой» материей. Вследствие этого основы этой теории остались навечно темными. Истинной основой теории было уравнение в частных производных, сведение которого к механическим элементам оставалось всегда проблематичным.

В теоретическую концепцию электрических и магнитных явлений были вновь введены особого рода массы, причем допускалось существование сил, действующих между ними на расстоянии, подобно гравитационным силам Ньютона. Этот особый вид материи казался, тем не менее, лишенным фундаментального свойства инерции, и силы, действующие между этими массами и весомой материей, остались неизвестными. К приведенным трудностям добавлялся еще не втискиваемый в схему классической механики полярный характер этих видов материи. Основа теории стала еще менее удовлетворительной, когда узнали об электродинамических явлениях, хотя эти явления позволили физикам объяснить магнитные явления электродинамическими и сделали излишним допущение о магнитных массах. Возмездием за этот успех была необходимость допущения все возрастающей сложности сил взаимодействия между движущимися электрическими массами.

Теория электрического поля Фарадея и Максвелла, благодаря которой удалось выйти из этого затруднительного состояния, представляет, очевидно, наиболее глубокое превращение, которое основание физики претерпело со времени Ньютона. Это был новый шаг в направлении конструктивной спекуляции, который увеличил расстояние между фундаментом теории и тем, что мы можем узнать нашими пятью чувствами. Существование поля проявляется, фактически, только когда вводится электрически заряженное тело. Дифференциальные уравнения Максвелла связывают пространственные и временные дифференциальные коэффициенты электрического поля и магнитного поля. Электрические массы становятся лишь местами, где дивергенция электрического поля не равна нулю. Световые волны появляются как волновые процессы электромагнитного поля в пространстве.

Конечно, Максвелл еще пытался интерпретировать свою теорию поля механически, с помощью моделей эфира. Но эти попытки

постепенно отступали и, освобожденные от всех ненужных при- датков, фигурируют, по представлениям Г. Герца, лишь на втором плане, так что в этой теории поле заняло в конце концов то главенствующее положение, которое в механике Ньютона занимали материальные точки. Все-таки в начале это было применимо только к электромагнитному полю в пустоте.

В своей начальной фазе теория была еще совершенно неудов- летворительной для объяснения явлений внутри вещества, пото- му что здесь необходимо было ввести два электрических вектора, связанных соотношениями, зависящими от природы среды и недо- ступными какому-нибудь теоретическому анализу. Аналогичное положение возникает в связи с магнитным полем и с соотноше- нием между плотностью электрического тока и полем. Для избавления от трудностей Г. А. Лоренц нашел способ, который од- новременно указывал путь для электродинамической теории дви- жущихся тел, более или менее свободной от произвольных допуще- ний. Его теория была основана на следующих основных гипо- тезах.

Повсюду (и внутри весоных тел) местонахождением поля яв- ляется пустое пространство. Участие материи в электромагнитных явлениях обусловлено тем, что ее элементарные частицы несут неизменные электрические заряды и поэтому подвержены дей- ствию пондеромоторных сил и, с другой стороны, обладают свой- ством порождать поле. Элементарные частицы подчиняются зако- ну движения Ньютона для материальной точки.

Опираясь именно на эту основу, Лоренц добился синтеза меха- ники Ньютона и теории поля Максвелла. Слабость этой теории состоит в том, что она пытается постигнуть явления сочетанием уравнений в частных производных (уравнения Максвелла для поля в пустоте) и уравнений в полных производных (уравнения движения точки); этот прием противостоит естественный. Мало удовлет- воряющая часть теории явно проявляется в необходимости допу- стить конечность размеров частиц и, кроме того, в необходимости уклоняться от того факта, что существующее на их поверхности электромагнитное поле становится бесконечно большим. Теория была совершенно неспособна объяснить огромные силы, которые удерживают электрические заряды на отдельных частицах. Лоренц принял эти слабости теории, которые он прекрасно знал, чтобы наконец правильно объяснить явления хотя бы в их общих чертах.

Впрочем, у него было одно соображение, которое выходило за рамки его теории. Вблизи электрически заряженного тела имеется магнитное поле, которое вносит вклад (видимый) в его инерцию. Нельзя ли объяснить *общую* инерцию частиц электромагнитным путем? Ясно, что эта задача могла быть разработана удовлетво- рительно, только если частицы могли интерпретироваться как ре- гулярные решения электромагнитных уравнений в частных про-

изводных. Уравнения Максвелла в их первоначальной форме не позволяли, однако, дать такое описание частиц, потому что соот- ветствующие решения содержали сингулярность. Поэтому физики- теоретики долгое время пытались достигнуть цели видоизменением уравнений Максвелла. Все-таки эти попытки не увенчались успе- хом. Так случилось, что в это время цель — построение чисто поле- вой электромагнитной теории материи — не была достигнута, хотя никакие возражения нельзя было привести против принципиаль- ной возможности достижения такой цели. Новой попытке в этом направлении препятствовало отсутствие какого-либо систематиче- ского метода, ведущего к решению. Тем не менее мне кажется до- стоверным, что в основе последовательной теории поля помимо понятия поля не должно быть никакого понятия, относящегося к частицам. Вся теория должна основываться только на уравнениях в частных производных и их решениях, свободных от сингуляр- ностей.

§ 4. Теория относительности

Не существует никакого индуктивного метода, который мог бы вести к фундаментальным понятиям физики. Не зная этого обстоятельства, многие исследователи XIX в. стали жертвами серьезной философской ошибки. Очевидно по этой причине моле- кулярная теория и теория Максвелла могли утвердиться только в сравнительно позднее время. Логическое мышление по необхо- димости дедуктивное, оно основано на гипотетических представ- лениях и аксиомах. В какой мере можно ожидать, что последние избраны именно так, чтобы оправдать надежду достижения вслед- ствие этого определенного успеха?

Наиболее удовлетворительное положение безусловно достигается в том случае, когда новые фундаментальные гипотезы навеяны самим экспериментом. Составляющая основу термодинамики ги- потеза о невозможности вечного движения представляет пример фундаментальной гипотезы, навеянной экспериментом; это же верно для принципа инерции Галилея. К этой же категории отно- сятся, между прочим, фундаментальные гипотезы теории относи- тельности, которая привела к развитию и неожиданному расшире- нию теории поля и замене основ классической механики.

Успехи теории Максвелла — Лоренца внушили веру в истин- ность электромагнитных уравнений для пустого пространства, а также, в частности, в утверждение, что свет распространяется «в пространстве» с определенной постоянной скоростью c . Но яв- ляется ли закон инвариантности скорости света действительным относительно любой инерциальной системы? Если это не имеет места, тогда одна особая инерциальная система, точнее, состояние особого движения (тела отсчета), отличается от всех остальных.

Против этой идеи восстают, однако, все механические и оптические данные нашего опыта.

По этим соображениям стало необходимым рассматривать истинность закона постоянства скорости света для всех инерциальных систем как принцип. Отсюда вытекает, что пространственные координаты x_1, x_2, x_3 и время x_4 должны преобразоваться согласно «преобразованиям Лоренца», которые характеризуются инвариантностью выражения

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2,$$

если единица времени выбрана так, что скорость света $c = 1$.

Благодаря такому приему время потеряло свой абсолютный характер и стало рассматриваться как алгебраически подобное (почти) пространственным координатам. Абсолютный характер времени, и в частности одновременности, был опровергнут, и четырехмерное описание было введено как единственное адекватное.

Чтобы учесть также эквивалентность всех инерциальных систем относительно всех явлений природы, необходимо постулировать и инвариантность относительно преобразования Лоренца всех систем физических уравнений, выражающих общие законы. Выполнение этого требования составляет содержание частной теории относительности.

Эта теория совместима с уравнениями Максвелла, но она не совместима с основами классической механики. Правда, уравнения движения материальной точки (и вместе с ними выражения для количества движения и кинетической энергии материальной точки) могут быть видоизменены так, чтобы удовлетворить теории; но понятие силы взаимодействия и вместе с ним понятие потенциальной энергии системы потеряли свою основу, так как эти понятия базировались на идее абсолютной одновременности. Поле, поскольку оно определяется дифференциальными уравнениями, заняло место силы.

Так как теория, о которой идет речь, допускает взаимодействие только между полями, становится необходимой теория гравитационного поля. Действительно, не трудно сформулировать теорию, в которой, как и в теории Ньютона, гравитационное поле может быть сведено к скаляру, являющемуся решением уравнения в частных производных. Во всяком случае, экспериментальные факты, выраженные в теории гравитации Ньютона, ведут к другому направлению — общей теории относительности.

Неудовлетворительным пунктом основ классической механики является двойная роль, которую играет одна и та же постоянная масса; она входит как «инертная масса» в закон движения и как «тяжелая масса» в закон тяготения. В результате этого ускорение тела в гравитационном поле не зависит от содержащейся в нем материи; или в *равномерно-ускоренной* относительно «инерциаль-

ной системы» системе координат движение происходит так же, как оно бы происходило в однородном гравитационном поле относительно «покоящейся» системы координат. Если допустить, что эквивалентность этих двух масс является полной, то этим добиваемся приспособления нашей теоретической мысли к тому факту, что тяжелая и инертная массы тождественны.

Отсюда вытекает, что нет никаких доводов считать преимущественность «инерциальных систем» фундаментальным принципом, и мы должны допустить, что *нелинейные* преобразования координат x_1, x_2, x_3, x_4 тоже с полным правом являются эквивалентными. Если произвести такое преобразование системы координат специальной теории относительности, то метрика

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$$

становится общей (римановой) метрикой Бана $ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$ (суммирование по μ и ν), где $g_{\mu\nu}$, симметричные относительно μ и ν , являются некоторыми функциями $x_1, \dots, x_4$, которые описывают одинаково хорошо как метрические свойства, так и гравитационное поле относительно новой системы координат.

Прогресс в трактовке основ механики, о котором мы говорили, имеет, однако, как показывает более тщательный анализ, то неудобство, что новые координаты не могут быть интерпретированы как результаты измерений с помощью твердых тел и часов, как это делалось в исходной системе (инерциальной системе с исчезающим гравитационным полем).

Переход к общей теории относительности осуществляется с помощью предположения, что указанное представление свойств поля пространства с помощью функций $g_{\mu\nu}$ (т. е. римановой метрикой) обосновано и в *общем* случае, когда не существует системы координат, относительно которой метрика приобретает простую квазиевклидову форму специальной теории относительности.

Другими словами, координаты сами по себе уже не выражают метрических соотношений, а только «близость» описанных предметов, координаты которых мало отличаются друг от друга. Все преобразования координат допустимы постольку, поскольку эти преобразования свободны от сингулярностей. Только уравнения, являющиеся ковариантными относительно произвольных в этом смысле преобразований, имеют смысл выражений общих законов природы (постулат общей ковариантности).

Первой целью общей теории относительности является установление предварительной формулировки, которую, пренебрегая требованием, чтобы она сама по себе составляла нечто завершенное, можно было возможно проще связать с «непосредственно наблюдаемыми фактами». Теория гравитации Ньютона дала подобный пример, ограничившись чистой механикой тяготения. Эта предварительная формулировка может быть охарактеризована следующим образом.

1. Понятие материальной точки и ее массы сохраняется. Формулируется закон ее движения, являющийся переводом закона инерции на язык общей теории относительности. Этот закон представляет собой систему уравнений в полных производных, характеризующей геодезическую линию.

2. Вместо ньютоновского закона гравитационного взаимодействия, мы найдем систему наиболее простых общековариантных дифференциальных уравнений, которую можно установить для тензора $g_{\mu\nu}$. Она образуется сведением к нулю однократно свернутого тензора кривизны Римана ($R_{\mu\nu} = 0$).

Эта формулировка позволяет рассматривать проблему планет. Точнее говоря, она позволяет рассматривать проблему движения материальных точек с практически пренебрегаемой массой в поле тяготения, образованном материальной точкой, которую предполагают не обладающей никаким движением (центральная симметрия). Она не учитывает реакции материальных точек, «движущихся» в гравитационном поле, и не принимает во внимание, каким образом центральная масса образует это поле.

Аналогия с классической механикой показывает, что теорию можно дополнить следующим образом. Возьмем уравнение поля

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = -T_{ik},$$

где R_{ik} обозначает скаляр римановой кривизны, T_{ik} — тензор энергии материи в феноменологическом представлении. Левая часть уравнения выбрана таким образом, что ее дивергенция тождественно равна нулю. Вытекающее отсюда равенство нулю дивергенции правой части дает «уравнения» материи в форме уравнений в частных производных для случая, когда T_{ik} вводит для описания материи только *четыре* функции, совершенно независимых друг от друга (например, плотность, давление и компоненты скорости, где между последними существует тождество, а между давлением и плотностью — уравнение условий).

При такой формулировке вся механика тяготения сведена к решению одной системы ковариантных уравнений в частных производных. Эта теория избегает всех внутренних противоречий, в которых мы упрекали классическую механику. Она достаточна, насколько мы знаем, для выражения наблюдаемых фактов небесной механики. Но она похожа на здание, одно крыло которого сделано из изящного мрамора (левая часть уравнения), а другое — из плохого дерева (правая часть уравнения). Феноменологическое представление материи лишь очень несовершенно заменяет такое представление, которое соответствовало бы всем известным свойствам материи.

Нетрудно объединить теорию электромагнитного поля Максвелла и теорию гравитационного поля, если ограничиваться пространством, свободным от весомой материи и электрической плотности. Все, что необходимо сделать, — это взять во втором члене приве-

денного выше уравнения для T_{ik} тензор энергии электромагнитного поля в пустом пространстве и присоединить к системе так измененных уравнений записанное в общековариантной форме уравнение поля Максвелла для пустого пространства. При таких условиях между всеми этими уравнениями будет существовать достаточное для обеспечения их прочности число дифференциальных тождеств. Можно добавить, что это необходимое формальное свойство всей системы уравнений оставляет произвольным выбор знака T_{ik} , что окажется важным в дальнейшем.

Результатом желания достигнуть для фундамента теории наибольшей возможной степени единства были различные попытки объединить гравитационное и электромагнитное поля в единую формальную и однородную картину. Здесь мы должны отметить, в частности, пятимерную теорию Калузы и Клейна. Рассмотрев весьма тщательно эту возможность, я нахожу, что предпочтительнее согласиться с отсутствием внутренней однородности первоначальной теории, ибо не думаю, чтобы совокупность гипотез, составляющих основу пятимерной теории, содержала меньше произвольности, чем первоначальная теория. То же замечание может быть сделано и относительно проективной разновидности теории, весьма тщательно разработанной, в частности, Дантцигом и Паули.

Предыдущие рассуждения относятся исключительно к теории поля, свободного от материи. Как нужно поступить, исходя из этого, чтобы получить полную теорию для материи, состоящей из атомов? В такой теории сингулярности безусловно должны быть исключены, потому что без такого исключения дифференциальные уравнения не определяют полностью общее поле. Здесь, в общей теории относительности, мы встречаемся с той же проблемой теоретического представления поля, которая впервые появилась в связи с чисто максвелловской теорией.

Попытка построения частиц, исходя из теории поля, очевидно, вновь ведет к сингулярностям. И здесь была сделана попытка исправить недостаток путем введения новых переменных поля, переработав и расширив систему уравнений поля. Между тем я, в сотрудничестве с доктором Розеном, недавно открыл, что вышеотмеченное простейшее сочетание уравнений гравитационного и электромагнитного полей дает центрально-симметричные решения, которые можно представить свободными от сингулярностей (хорошо известные центрально-симметричные решения Шварцшильда для чисто гравитационного поля и Рейснера для электрического поля с учетом его гравитационного действия). Мы еще вернемся к этому в параграфе 6. Таким образом, представляется возможным получить для материи и ее взаимодействий чисто полевую теорию, избавленную от дополнительных гипотез, — теорию, которая к тому же может быть экспериментально проверена и которая в конце концов подвержена лишь математическим трудностям, правда, очень серьезным.

§ 5. Теория квант и основы физики

Физики-теоретики нашего поколения ожидают, что для физики будет построена новая теоретическая основа, которая воспользуется фундаментальными представлениями, значительно отличающимися от представлений рассмотренной до сих пор теории поля. Основанием для этого служит признание необходимости использования новых методов исследования при математическом представлении явлений, получивших название квантовых.

Тогда как недостатки классической механики, выявленные теорией относительности, связаны с конечностью скорости света (исключается ее бесконечность), в начале нашего века было обнаружено, что между выводами механики и результатами опыта существуют другие противоречия, которые связаны с конечным значением (исключается равенство нулю) постоянной Планка h . В частности, молекулярная механика требует, чтобы теплоемкость и плотность излучения (монохроматического) твердых тел убывали пропорционально уменьшению их абсолютной температуры; опыт показал, что эти величины убывают быстрее абсолютной температуры. Для теоретического объяснения их поведения необходимо предполагать, что энергия механической системы может принимать не любые, а только определенные дискретные значения, математическое выражение которых всегда зависит от постоянной Планка h . Больше того, эта концепция была существенно важной для теории атома (теория Бора). Для перехода атомов из одного состояния в другое — с излучением или поглощением и без них — нельзя было указать никакого каузального закона, а только статистический; к такому же заключению пришли и для радиоактивного распада атомов, который тоже тщательно изучался в эту эпоху. Более двух десятилетий физики безуспешно пытались найти единую интерпретацию этого «квантового характера» определенных групп явлений. Такая попытка увенчалась успехом около 10 лет назад путем использования двух совершенно различных теоретических методов. Одним из этих методов мы обязаны Гейзенбергу и Дираку, другим — Л. де Бройлю и Шредингеру. Математическая эквивалентность обоих методов была вскоре доказана Шредингером. Хочу попытаться наметить ход мыслей Л. де Бройля и Шредингера, который ближе к способу мышления физиков, а затем изложить некоторые общие соображения.

Вначале вопрос ставится так: каким образом можно определить для системы дискретный ряд значений энергии H_0 , определяемой в смысле классической механики (энергия является заданной функцией координат q_r и соответствующих количеств движения p_r)? Константа Планка h связывает частоту H_0/h со значениями энергии H_0 . Следовательно, достаточно дать системе ряд дискретных значений частоты. Это напоминает нам, что в акустике ряд дискретных значений частоты соответствует линейному урав-

нению в частных производных (если граничные условия заданы), т. е. периодическим синусоидальным решениям. Аналогичным способом Шредингер поставил себе задачу сопоставить заданной функции энергии $\varepsilon(q_r, p_r)$ уравнение в частных производных для некоторой скалярной функции ψ , где q_r и время t являются независимыми переменными. Ему это удалось (для комплексной функции ψ) в том смысле, что теоретические значения энергии H_0 , указанные статистической теорией, действительно вытекают удовлетворительным образом из периодического решения уравнения.

Само собой разумеется, что было невозможно сопоставить определенному решению $\psi(q_r, t)$ уравнения Шредингера определенное движение материальных точек в механическом смысле. Это означает, что функция ψ не определяет, по крайней мере точно, историю q_r как функции времени. Однако, следуя Борну, физическое значение функций ψ может интерпретировать следующим образом: $\psi\bar{\psi}$ (квадрат абсолютного значения комплексной функции ψ) является плотностью вероятности конфигураций q_r в момент t в рассматриваемой точке конфигурационного пространства. Следовательно, содержание уравнения Шредингера можно характеризовать следующим, легко понимаемым, но не совсем точным образом: оно определяет изменение во времени плотности вероятности статистического ансамбля систем в пространстве конфигураций. Коротко говоря, уравнение Шредингера определяет изменение во времени функции ψ от q_r .

Необходимо отметить, что результаты этой теории содержат результаты механики точки как предельные значения, когда длина волны, с которой встречаются при решении задачи Шредингера, повсюду столь мала, что потенциальная энергия меняется практически бесконечно мало при изменениях порядка одной длины волны в конфигурационном пространстве. При этих условиях ясно выделяется следующее: выберем в конфигурационном пространстве область G_0 , большую (по всем размерам) относительно длины волны, но малую по сравнению с практическими размерами конфигурационного пространства. При этих условиях возможно выбрать функцию ψ так, что для начального момента t_0 она исчезает вне области G_0 и ведет себя, в соответствии с уравнением Шредингера, таким же образом, по крайней мере приближенно, и для последующего времени, но относительно области, которая к этому времени t перешла в другую область G . Тогда можно будет с определенной степенью приближения говорить о движении области G в целом и заменить это движение движением точки в конфигурационном пространстве. Это движение совпадает с требуемыми уравнениями классической механики.

Опыты по интерференции корпускулярных лучей дали блестящее подтверждение того, что предполагаемый теорией волновой характер явлений движения действительно соответствует фактам. Кроме того, теории легко удалось вывести статистические законы

перехода системы из одного квантового состояния в другое под действием внешних сил, что, с точки зрения классической механики, казалось чудом. Внешние силы здесь представлены небольшими, зависящими от времени приращениями потенциальной энергии. Тогда как в классической механике такие приращения могут вызвать только соответственно малые изменения в системе, в квантовой механике они же вызывают изменения любой величины, но с соответственно малой вероятностью; это следствие полностью соответствует опыту. Теория даже позволила понять, по крайней мере в основных чертах, законы радиоактивного распада.

Очевидно, в прошлом никогда не была развита теория, которая, подобно квантовой, дала бы ключ к интерпретации и расчету группы столь разнообразных явлений. Несмотря на это я все-таки думаю, что в наших поисках единого фундамента физики эта теория может привести нас к ошибке: она дает, по-моему, неполное представление о реальности, хотя и является единственной, которую можно построить на основе фундаментальных понятий силы и материальных точек (квантовые поправки к классической механике). Неполнота представления является результатом статистической природы (неполноты) законов. Я хочу сейчас обосновать это мнение.

Я спрашиваю сначала — до какой степени функция ψ описывает реальное состояние механической системы? Допустим, что ψ_r — периодические решения уравнения Шредингера (расположенные в порядке возрастания значений энергии). Я оставляю пока в стороне вопрос о том, в какой степени отдельные ψ_r дают полное описание физических состояний. Вначале система находится в состоянии ψ_1 с наименьшей энергией E_1 . Затем в течение конечного промежутка времени на систему действует небольшая возмущающая сила. Для некоторого последующего момента из уравнения Шредингера получаем функцию ψ в виде:

$$\psi = \sum C_r \psi_r,$$

где C_r — постоянные (комплексные). Если ψ_r «нормированы», то C_1 почти равен единице, C_2 и т. д. малы по сравнению с единицей. Можно теперь спросить: описывает ли ψ действительное состояние системы? Если ответ положительный, то единственное, что нам остается, — это приписать¹ этому состоянию определенную энергию E , а именно такую, которая не намного превосходит E_1 (во всяком случае $E_1 < E < E_2$). Но такое предположение противоречит опытам Франка и Герца по соударению электронов, если к этому же принято данное Милликемом доказательство дискретной природы электричества. В действительности, эти опыты приводят к заключению, что между двумя квантовыми значениями не существует никаких других значений энергии. Отсюда следует, что

¹ Потому что, согласно прочно установленному следствию теории относительности, энергия системы (в покое) равна ее массе (как целого). А последняя должна иметь вполне определенное значение.

наша функция ψ никоим образом не описывает однородное состояние системы, а скорее представляет собой статистическое описание, при котором C_r выражают вероятности отдельных значений энергии. Следовательно, кажется очевидным, что данное Борном статистическое истолкование квантовой теории является единственно возможным. Функция ни в коем случае не описывает состояние, свойственное одной единственной системе; она относится скорее к нескольким системам, т. е. к «ансамблю систем», в смысле статистической механики. Если, исключая некоторые особые случаи, функция дает только статистические данные об измеримых величинах, то причина состоит не только в том, что операция измерения вносит неизвестные элементы, которые можно уловить лишь статистически, а в самом факте, что функция ψ ни в коем смысле не описывает состояния одной отдельной системы.

Такая интерпретация устраняет также и указанный недавно мною и моими двумя сотрудниками парадокс, относящийся к следующей проблеме.

Рассмотрим механическую систему, состоящую из двух отдельных систем A и B , взаимодействующих только в течение ограниченного времени. Пусть задана функция ψ до взаимодействия. Тогда уравнение Шредингера даст функцию ψ после взаимодействия. Определим теперь физическое состояние подсистемы A настолько полно, насколько это допускается измерениями. Тогда квантовая механика позволяет нам определить функцию ψ для подсистемы B по сделанным измерениям и функции ψ для всей системы. Это определение, однако, дает результат, который зависит от того, какие определяющие величины, характеризующие состояние A , измерялись (например, координаты или количества движения). Поскольку после взаимодействия для B может существовать только одно физическое состояние, которое нельзя себе разумно представить зависящим от отдельных измерений, произведенных над системой A , отделенной от B , можно заключить, что функции ψ нельзя однозначно сопоставить физическое состояние. Это сопоставление нескольких функций ψ одному и тому же физическому состоянию системы B вновь показывает, что функция не может интерпретироваться как описание (полное) физического состояния одной отдельной системы. Здесь также все трудности исчезают, если функция ψ сопоставляется ансамблю систем¹.

Тот факт, что квантовая механика позволяет столь просто получить выводы, касающиеся прерывных переходов (кажущихся) из одного общего состояния в другое, не давая фактически представления об отдельных процессах, связан с другим фактом, а именно, что теория в действительности оперирует не с отдельной системой,

¹ Операция измерения A , например, также содержит в себе переход к более ограниченному ансамблю систем. Последний (а значит, и его функция ψ) зависит от того, с какой точки зрения было произведено ограничение ансамбля систем.

а с ансамблем систем. Коэффициенты C_r в нашем первом примере очень мало меняются под действием внешних сил. Такая интерпретация квантовой механики позволяет понять, почему эта теория так легко объясняет способность малых возмущающих сил вызывать изменения любой величины в физическом состоянии системы. Такие возмущающие силы вызывают фактически лишь соответствующие малые изменения статистической плотности ансамбля систем, а следовательно, бесконечно малые изменения функции ψ ; математическое выражение этих изменений представляет гораздо меньше трудностей, чем представляло математическое выражение конечных изменений, претерпеваемых отдельными системами. Что происходит в отдельной системе, остается, правда, при такой манере мышления совершенно невыясненным; статистическая точка зрения совершенно исключает из рассмотрения эти таинственные процессы.

Но теперь я спрашиваю: неужели какой-нибудь физик действительно верит, что нам не удастся узнать что-либо о важных внутренних изменениях в отдельных системах, об их структуре и причинных связях? И это несмотря на возникшие благодаря замечательным открытиям камеры Вильсона и счетчика Гейгера возможности исследования? Думать так логически допустимо, но это настолько противоречит моему научному инстинкту, что я не могу отказаться от поисков более полной концепции.

К этому мы хотели бы добавить некоторые соображения иного рода, которые также свидетельствуют против идеи, что введенные квантовой механикой методы способны создать основу, пригодную для всей физики. В уравнении Шредингера абсолютное время и потенциальная энергия играют решающую роль, тогда как теорией относительности эти два понятия признаны в принципе недопустимыми. Чтобы избежать этих трудностей, нужно основать теорию на понятии поля и законах полей, а не на силах взаимодействия. Это приводит к распространению статистических методов квантовой механики на поля, т. е. на системы с бесконечным числом степеней свободы. Хотя во всех сделанных до сих пор попытках ограничивались линейными уравнениями, которые, как мы знаем по данным общей теории относительности, не достаточны, встретившиеся при осуществлении уже этих весьма остроумных попыток осложнения ужасающе велики. Они возрастают чрезвычайно, если мы хотим удовлетворить требованиям общей теории относительности, правомочность которой в принципе никем не может оспариваться.

Необходимо отметить, конечно, что введение пространственно-временного континуума может считаться противоестественным, если иметь в виду молекулярную структуру всего происходящего в микромире. Утверждают, что успех метода Гейзенберга может быть приведен к чисто алгебраическому методу описания природы, т. е. исключению из физики непрерывных функций. Но тогда

нужно будет в принципе отказаться от пространственно-временного континуума. Можно думать, что человеческая изобретательность в конце концов найдет методы, которые позволят следовать этому пути. Но в настоящее время такая программа смахивает на попытку дышать в безвоздушном пространстве.

Нет сомнения, что в квантовой механике имеется значительный элемент истины и что она станет пробным камнем для любой будущей теоретической основы, из которой она должна будет быть выведена как частный случай, подобно тому, как электростатика выводится из уравнений Максвелла для электромагнитного поля или термодинамика из классической механики. Однако я не думаю, что квантовая механика является *исходной точкой* поисков этой основы, точно так же, как нельзя, исходя из термодинамики (или, соответственно, из статистической механики), прийти к основам механики.

Учитывая такое положение, кажется вполне оправданным серьезное рассмотрение вопроса о том, нельзя ли *каким-нибудь* образом привести в соответствие основу физики поля с данными квантовой теории? Не является ли она единственной основой, которая, в соответствии с современными возможностями математики, может быть адаптирована к требованиям общей теории относительности? Господствующая среди современных физиков вера в совершенную безнадежность таких попыток коренится в необоснованном мнении, что в первом приближении такая теория должна привести к уравнениям классической механики для движения частиц или по крайней мере к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Фактически до настоящего времени нам ни разу не удалось теоретически представить частицы с помощью полей, свободных от сингулярностей, и мы не можем ничего а priori сказать по поводу поведения таких сущностей. Однако одно достоверно: если теории поля удастся представить частицы без сингулярностей, то поведение этих частиц во времени будет однозначно определяться дифференциальными уравнениями поля.

§ 6. Теория относительности и частицы

Я хочу теперь показать, что, согласно общей теории относительности, существуют свободные от сингулярностей решения уравнений поля, причем эти решения можно интерпретировать как представляющие частицы. Я ограничиваюсь здесь случаем нейтральных частиц, так как совместно с доктором Розеном в недавней работе подробно рассматривал этот вопрос, а также потому, что в этом случае можно полностью выявить суть проблемы.

Гравитационное поле полностью описывается тензором $g_{\mu\nu}$. В трехиндексном символе $\Gamma_{\mu\nu\sigma}$ также появляются контраварианты $g^{\mu\nu}$, определяемые как частные от деления миноров $g_{\mu\nu}$ на

детерминат $g(=|g_{\alpha\beta}|)$. Для того чтобы R_{ik} были определенными и конечными, недостаточно задать систему координат в окрестности любой части континуума так, чтобы $g_{\mu\nu}$ и их первые производные были бы непрерывными и дифференцируемыми; необходимо также, чтобы детерминат нигде не равнялся нулю. Это последнее ограничение все-таки исключается, если дифференциальные уравнения $R_{ik} = 0$ заменить на $g^2 R_{ik} = 0$, левые части которых являются целыми рациональными функциями g_{ik} и их производных.

Эти уравнения имеют центрально-симметричные решения, указанные Шварцшильдом,

$$ds^2 = \frac{1}{1 - \frac{2m}{r}} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) + \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2.$$

Это решение имеет сингулярность при $r = 2m$, так как коэффициент при dr^2 (т. е. $g_{1,1}$) становится бесконечным на этой гиперповерхности. Если теперь заменить переменную r на ρ по формуле

$$\rho^2 = r - 2m,$$

получим

$$ds^2 = -4(2m + \rho^2)d\rho^2 - (2m + \rho^2)^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) + \frac{\rho^2}{2m + \rho^2} dt^2.$$

Это регулярное решение при всех значениях ρ . Правда, исчезновение коэффициента при dt^2 ($g_{4,4}$) при $\rho = 0$ приводит к равенству нулю детерминанта g при этом значении; но при принятом методе записи уравнений поля это не образует сингулярности.

Если ρ меняется от $-\infty$ до $+\infty$, r меняется от $+\infty$ до $r = 2m$ и обратно до $+\infty$, тогда как значениям $r < 2m$ не соответствуют никакие действительные значения ρ . Отсюда следует, что решение Шварцшильда становится регулярным, если представить физическое пространство состоящим из двух «оболочек», граничащих вдоль гиперповерхности $\rho = 0$, т. е. $r = 2m$, тогда как на самой гиперповерхности детерминат равен нулю. Будем называть такую связь между двумя оболочками (тождественными) «мостом». Следовательно, существование такого моста между двумя оболочками в конечной области соответствует существованию нейтральной матеральной частицы, описанной способом, свободным от сингулярностей.

Решение проблемы движения нейтральных частиц, очевидно, сводится к нахождению решений тех уравнений гравитации (написанных без знаменателей), которые содержат несколько мостов.

Изложенная выше концепция соответствует, а priori, атомистической структуре материи, поскольку мосты по своей природе дискретны. Кроме того, мы видим, что константа массы m нейтральных частиц должна быть существенно положительной, так как отрицательным значениям m не может соответствовать какое-либо свободное от сингулярностей решение Шварцшильда. Только ис-

следование проблемы многих мостов может показать, дает ли этот теоретический метод объяснение эмпирически установленному равенству масс частиц в природе и учитывает ли он все факты, столь превосходно охваченные квантовой механикой.

Аналогичным образом можно показать, что комбинированные уравнения гравитации и электричества (при надлежащем выборе знака электрических членов в уравнениях гравитации) дают свободное от сингулярностей мостовое представление электрической частицы. Наиболее простое решение этого рода относится к электрической частице, не имеющей гравитационной массы.

До тех пор, пока не преодолены значительные математические трудности проблемы многих мостов, нельзя ничего утверждать о пользе теории с точки зрения физика. Тем не менее она несомненно является первой попыткой последовательной разработки полевой теории, дающей возможность объяснить свойства вещества. В пользу этой попытки говорит и то обстоятельство, что она основана на релятивистских уравнениях поля, наиболее простых из известных в настоящее время.

Резюме

Физика представляет собой развивающуюся логическую систему мышления, основы которой можно получить не выделением их какими-либо индуктивными методами из пережитых опытов, а лишь свободным вымыслом. Обоснование (истинность) системы основано на доказательстве применимости вытекающих из нее теорем в области чувственного опыта, причем соотношения между последними и первыми можно понять лишь интуитивно. Эволюция происходит в направлении все увеличивающейся простоты логических основ. Больше того, чтобы приблизиться к этой цели, мы должны решиться признать, что логическая основа все больше и больше удаляется от данных опыта, и мысленный путь от основ к вытекающим из них теоремам, коррелирующимся с чувственными опытами, становится все более трудным и длинным.

Наша цель состояла в том, чтобы возможно короче наметить картину развития основных понятий в их связи с опытными фактами и усилиями достичь внутреннего совершенства системы. Было также необходимо выяснить с помощью этих соображений современное состояние вещей так, как оно мне представляется (схематическое историческое изложение неизбежно носит некоторую личную окраску).

Я стремился показать, каким образом связаны между собой и с природой эксперимента понятия телесного объекта, пространства, субъективного и объективного времени. В классической механике понятия пространства и времени независимы друг от друга. Понятие телесного объекта заменялось в самой основе

понятием материальной точки, благодаря чему механика стала существенно атомистической. Свет и электричество порождали непреодолимые трудности, когда пытались сделать механику основой для всей физики. Это приводит к теории электрического поля и к попытке основать всю физику на понятии поля (после попытки компромисса с классической механикой). Эта попытка ведет к теории относительности (превращение понятий пространства и времени в континуум с метрической структурой).

Я старался, далее, доказать, почему, по моему мнению, квантовая теория не выглядит способной дать фундамент, полезный для физики. Попытки рассматривать теоретическое квантовое описание как *полное* описание отдельных физических систем или отдельных событий приводят к противоречиям.

С другой стороны, теория поля до сих пор не в состоянии дать объяснение молекулярной структуры материи и квантовых явлений. Тем не менее было показано, что убеждение в неспособности теории поля разрешить своими методами эти проблемы основывается на некотором предубеждении.

О МЕТОДЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Если вы желаете узнать у физиков-теоретиков об их методе, то я вам советую руководствоваться следующим принципом: судите не по их словам, а по делам. Тому, кто творит, плоды собственной фантазии кажутся настолько необходимыми и естественными, что он сам их считает не образами мышления, а заданными реальностями и хочет, чтобы все так считали.

Может показаться, что эти слова произнесены для того, чтобы побудить вас покинуть лекцию. Ибо вы скажете себе: он сам является созидающим физиком, а потому должен предоставить размышления о структуре теоретической науки тем, кто занимается теорией познания.

С этой кафедры читаются лекции в память о человеке, посвятившем свою жизнь борьбе за единство познания. В оправдание себе могу заверить, что я поднялся на нее не для личного удовольствия, а по любезному приглашению. Но объективно мой труд может оправдаться, если все-таки окажется интересным узнать, что думает о своей науке один из тех, кто на протяжении долгих лет всеми силами стремился придавать ясность основам этой науки и совершенствовать их. Его точка зрения на прошлое и настоящее своей области науки может в очень большой степени зависеть от того, что он ждет от будущего и к чему стремится в настоящем; но такова судьба каждого, кто интенсивно углубился в мир идей. Он ведет себя подобно историку, группирующему — возможно, и бессознательно — прошедшие события вокруг тех представлений о человеческом обществе, которые он себе сам составил.

Мы здесь хотим кратко рассмотреть развитие теоретических систем, обратив при этом основное внимание на соотношение между содержанием теории и совокупностью экспериментальных данных. Речь идет о вечном противопоставлении в занимающей нас

области двух неотделимых составляющих нашего познания: опыта и мышления.

Мы почитаем древнюю Грецию как колыбель западной науки. Там была впервые создана геометрия Евклида — это чудо мысли, логическая система, выводы которой с такой точностью вытекают один из другого, что ни один из них не был подвергнут какому-либо сомнению. Это удивительнейшее произведение мысли дало человеческому разуму ту уверенность в себе, которая была необходима для его последующей деятельности. Тот не рожден для теоретических исследований, кто в молодости не восхищался этим творением.

Но чтобы созрели условия для занятий наукой, отражающей действительность, необходимо было установить еще одно положение, которое до Галилея и Ньютона не было общим достоянием философов. Чисто логическое мышление само по себе не может дать никаких знаний о мире фактов; все познание реального мира исходит из опыта и завершается им. Полученные чисто логическим путем положения ничего не говорят о действительности. Галилей стал отцом современной физики и вообще современного естествознания именно потому, что понял эту истину и внул ее научно-миру.

Если опыт является началом и концом всех наших знаний о действительности, то какова же тогда роль разума в науке?

Законченная система теоретической физики состоит из понятий, основных принципов, относящихся к этим понятиям, и следствий, выведенных из них путем логической дедукции. Именно эти следствия должны соответствовать отдельным нашим опытам; их логический вывод занимает в теоретическом труде почти все страницы.

Фактически то же самое имеется и в евклидовой геометрии, только там основные принципы называются аксиомами и речь не идет о том, что следствия должны удовлетворять каким-либо результатам опытов. Но если трактовать евклидову геометрию как учение о возможных взаимоположениях практически твердых тел, а следовательно, интерпретировать ее как физическую науку, не абстрагируясь от ее первоначального эмпирического содержания, то логическое сходство между геометрией и теоретической физикой оказывается полным.

Мы определили, таким образом, место опыта и мышления в системе теоретической физики. Мышление позволяет строить систему; содержание результатов опытов и связи между ними излагаются с помощью следствий, полученных из теории. Именно в возможности такого изложения заключены ценность и оправдание как всей системы, так и лежащих в ее основе понятий и принципов. Иначе последние остаются свободным творением человеческого ума, которое нельзя оправдать ни природой самого человеческого ума, ни тем более как-то априори.

Основные понятия и принципы, не сводимые уже к другим, составляют неизбежную, рационально неуловимую часть теории. Сделать эти основные элементы максимально простыми и немногочисленными, не упустив при этом адекватного изложения чего-либо, содержащегося в опытах, — вот главная цель любой теории.

Начертанное здесь представление о чисто умозрительном характере основ теории не было господствующим в XVIII и XIX вв. Но оно все больше распространяется по мере того, как мысленно возрастает расстояние между основными понятиями и принципами, с одной стороны, и подающимися опытной проверке следствиями, с другой. Оно все более распространяется и потому, что логическое построение все более унифицируется, т. е. становится возможным осуществить все построение на основе все меньшего числа логически независимых элементов.

Ньютон, творец первой обширной плодотворной системы теоретической физики, еще думал, что основные понятия и принципы его теории вытекают из опыта. Очевидно, именно в таком смысле нужно понимать его изречение «*Hypotheses non fingo*».

Фактически тогда казалось, что с понятиями пространства и времени не связано ничего проблематичного. Понятия массы, инерции, силы и закономерные соотношения между ними казались заимствованными непосредственно из опыта. Раз была принята такая основа, то и выражение для силы тяготения казалось выводимым из опыта. Можно было ожидать, что то же самое будет иметь место и для других сил.

Мы видим, правда, из формулировки Ньютона, что понятие абсолютного пространства, включающее в себя понятие абсолютного покоя, приносило ему мало радости. Он знал то обстоятельство, что в опытах этому последнему понятию ничего не соответствовало. Неприятное чувство у него возникло и при введении силы дальнего действия. Но громадные практические результаты его учения преобладали как ему, так и физикам XVIII и XIX вв., признавать умозрительный характер основ его теории.

Большинство физиков того времени были проникнуты мыслью, что основные понятия и принципы физики в логическом смысле не являются свободными творениями человеческого ума, а получены из опытов с помощью «абстракции», т. е. логическим путем. Ясное понимание неправильности такого представления фактически дала лишь общая теория относительности; она показала, что, опираясь на фундамент, значительно отличающийся от ньютоновского, можно объяснить соответствующий круг экспериментальных данных даже более удовлетворительным и полным образом, чем опираясь на фундамент, взятый Ньютоном. Не будем останавливаться на вопросах превосходства. Сам факт, что можно указать две существенно различные основы, в значительной мере согласующиеся с опытом, с совершенной очевидностью выявляет умо-

зрительный характер основных положений. Это во всяком случае доказывает, что любая попытка чисто логического вывода основных понятий и принципов механики из отдельных опытов обречена на неудачу.

Но если верно, что аксиоматические основы теоретической физики не выводятся из опыта, а должны быть свободно созданы, то можем ли мы вообще надеяться найти правильный путь? Даже больше: не существует ли этот правильный путь только в нашем воображении? Имеем ли мы право вообще надеяться, что опыт является верным путеводителем, если существуют теории, подобные классической механике, которые, не охватывая глубоко суть предмета, тем не менее широко подтверждаются опытом? На это я со всей уверенностью отвечаю, что, по моему мнению, такой путь существует и мы способны его найти. Весь наш предшествующий опыт приводит к убеждению, что природа является осуществлением того, что математически проще всего себе представить. Я убежден, что чисто математическое построение позволяет найти те понятия и те закономерные связи между ними, которые дают ключ к пониманию явлений природы. Пригодные математические понятия могут быть подсказаны опытом, но ни в коем случае не могут быть выведены из него. Опыт остается, естественно, единственным критерием пригодности некоторого математического построения для физики. Но собственно творческое начало относится к математике. Таким образом, я в известном смысле считаю оправданной мечту древних об овладении истиной путем чисто логического мышления.

Чтобы подтвердить эту веру, я вынужден пользоваться математическими понятиями. Физический мир представлен четырехмерным континуумом. Если принимать для него риманову метрику и ставить вопрос о простейших законах, которым может удовлетворять такая метрика, то приходим к релятивистской теории гравитации для пустого пространства. Если брать в этом пространстве поле вектора, или, соответственно, выведенное из него поле антисимметричного тензора, и ставить вопрос о простейших законах, которым может удовлетворять такое поле, то приходим к уравнениям Максвелла для пустого пространства.

Если мы даже дошли до этого, то надо сказать, что все еще нет теории для пространства с отличной от нуля электрической плотностью.

Луи де Бройль предсказал существование волнового поля, которое могло бы послужить для объяснения некоторых квантовых свойств материи. Дирак нашел в спинорах нового вида полевые величины, простейшие уравнения которых позволяют вывести многие свойства электрона. Вместе с моим сотрудником, доктором Вальтером Майером, мы нашли, что эти спиноры являются частным случаем нового, названного нами «полувектором», типа поля, математически связанного с четырехмерным. Простейшие уравне-

ния, которым можно подчинить такие полувекторы, дают ключ к пониманию того, почему существуют двойного рода элементарные частицы с различной тяжелой массой и равным, но противоположным зарядом. Эти полувекторы являются простейшими после обычных векторов математическими полевыми образами, возможными в метрическом континууме с четырьмя измерениями. Представляется, что они без труда описывают существенные свойства электрических элементарных частиц.

Для рассматриваемого нами вопроса существенно, что все эти образы и их закономерные связи можно получить, следуя принципу отыскания математически наиболее простых понятий и связей между ними. На ограниченности числа математически существующих простых видов полей и их уравнений основана надежда теоретиков постигнуть всю глубину истины.

Наиболее трудным пунктом полевых теорий такого типа пока является осмысливание атомистической структуры материи и энергии. Теория в своей основе не атомистична, поскольку она оперирует исключительно непрерывными функциями пространства. Этим она отличается от классической механики, важнейший элемент которой — материальная точка — уже удовлетворяет атомистической структуре материи. Современная квантовая теория в той установленной де Бройлем, Шредингером и Дираком форме, которая оперирует непрерывными функциями пространства, устранила эту трудность благодаря смелой интерпретации, впервые ясно сформулированной Максом Борном: встречающиеся в уравнениях функции пространства не претендуют быть математической моделью атомистических структур. Эти функции дают возможность вычислить только, какова вероятность найти при измерениях такие структуры в определенном месте, или, соответственно, в определенном состоянии движения. Эта концепция логически непротиворечива и дала уже значительные результаты. К сожалению, она вынуждает применять континуум, число измерений которого не равно принятому до сих пор в физике (а именно четырем), а неограниченно растет с числом частиц, образующих изучаемую систему. Не могу удержаться от признания, что приписываю этой интерпретации лишь преходящее значение. Я еще верю в возможность создания модели, т. е. теории, способной излагать сами сущности, а не только вероятности их проявления.

С другой стороны, я уверен, что в теоретической модели надо оставить мысль о полной локализации частиц. Мне это кажется прочным результатом соотношения неопределенностей Гейзенберга. Но можно себе представить в полном смысле (а не только на основе интерпретации) атомистическую теорию без локализации частиц в математической модели. Например, чтобы рассчитать атомистический характер электричества, уравнения поля должны привести только к следующему следствию: общий электрический заряд части трехмерного пространства, на границах которой электриче-

ская плотность повсюду равна нулю, всегда имеет целочисленное значение. Следовательно, в континуальной теории атомистический характер интегральных законов может быть выражен удовлетворительно без локализации элементов, составляющих атомистическую структуру.

Только если удастся такое изложение атомистического строения, я буду считать квантовую загадку разрешенной.

ОСНОВЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Наука — это попытка привести хаотическое многообразие нашего чувственного опыта в соответствие с некоторой единой системой мышления. В этой системе отдельные опыты сопоставляются с теоретической структурой таким образом, чтобы вытекающее отсюда соответствие было однозначным и убедительным.

Чувственные восприятия нам заданы; но теория, призванная их интерпретировать, создается человеком. Она является результатом исключительно трудоемкого процесса приспособления: гипотетического, никогда окончательно не законченного, постоянно подверженного спорам и сомнениям.

Способ образования понятий в науке отличается от применяемого в повседневной жизни не своими принципами, а лишь более точным определением понятий и следствий, более тщательным и систематическим отбором экспериментального материала и большей экономией мысли.

Под этим последним мы понимаем стремление свести все понятия и соотношения к возможно меньшему числу логически независимых друг от друга основных аксиом и понятий.

То, что мы называем физикой, охватывает группу естественных наук, основывающих свои понятия на измерениях, причем представления и утверждения этих наук поддаются математическому выражению. Следовательно, ее областью является та часть общей суммы нашего знания, которую можно выразить в математических терминах. По мере развития науки область физики настолько расширилась, что кажется ограниченной лишь возможностями собственного метода.

Большая часть физических исследований посвящена развитию различных отраслей физики; предметом каждой отрасли является теоретическое понимание большего или меньшего числа областей опыта; в каждой из них законы и понятия остаются по возможно-

сти тесно связанными с опытом. Именно этот раздел науки, со своей постоянно усиливающейся специализацией, за последние века революционизировал практическую жизнь и создал, наконец, возможность освобождения человека от бремени физического труда.

С другой стороны, с самого начала проявлялось стремление найти для унификации всех отраслей науки теоретическую основу, образованную минимальным числом понятий и фундаментальных соотношений, из которой логическим путем можно было бы вывести все понятия и соотношения отдельных дисциплин.

Вот что мы понимаем под поиском фундамента для физики в целом. Глубокое убеждение в достижимости этой цели является главным источником страстной преданности, которая всегда воодушевляет исследователя. Последующие замечания посвящены основам физики, понимаемым именно в этом смысле.

Из сказанного становится ясно, что слово «основа» в этой связи не означает чего-то во всех отношениях тождественного фундаменту здания. Правда, с логической точки зрения различные частные законы покоятся на этой основе. Но тогда как фундамент здания может остаться нетронутым даже если само здание серьезно повреждено сильным штормом или приливом воды, в науке дело обстоит совершенно иначе. Здесь новые опыты или новое открытие представляют большую опасность для логического основания, чем для отдельных дисциплин, которые теснее связаны с опытом. Большое значение основания определяется именно его связью с отдельными частями, но именно в этом таится и опасность перед лицом каждого нового факта. Когда мы отдаем себе в этом отчет, приходится удивляться, почему так называемые революционные эпохи в физике не меняли ее основу чаще и решительнее, чем это в действительности имело место.

Первая попытка установления единой теоретической основы представлена в трудах Ньютона. В его системе все сводится к следующим понятиям: (1) материальные точки с изменяющейся массой; (2) действие на расстоянии между двумя материальными точками; (3) закон движения материальной точки. Эта система не была, строго говоря, всеобъемлющей основой, поскольку закон действия на расстоянии был сформулирован явно только для гравитации, тогда как для всех остальных дальностей априори было установлено лишь равенство действия и противодействия. Кроме того, Ньютон полностью отдавал себе отчет, что время и пространство являются существующими элементами, эффективными физическими факторами, хотя в его системе это лишь подразумевалось.

Построенный Ньютоном фундамент оказался исключительно плодотворным и до конца XIX в. считался незыблемым. Он не только позволил объяснить до малейших деталей движение небесных тел, но и создал механику дискретных и непрерывных масс, дал

простое объяснение принципа сохранения энергии и блестящую законченную теорию тепла. Объяснения электродинамических явлений были несколько искусственными; наименее убедительной с самого начала была его теория света.

Не удивительно, что Ньютон не хотел ничего слышать о волновой теории света; такая теория была наиболее далекой от его общетеоретических воззрений. Предположение, что пространство заполнено состоящей из материальных точек средой, единственным механическим свойством которой является способность передавать свет, должно было ему казаться искусственным. Наиболее веские аргументы в пользу волновой природы света, как то: конечности его распространения, интерференция, дифракция, поляризация — были либо вовсе неизвестны, либо не систематизированы. Поэтому было естественно, что он остался на точке зрения корпускулярной теории света.

В течение XIX в. дискуссия завершилась победой волновой теории. Тем не менее по поводу возможности механического обоснования физики не выразилось никакого сомнения, в первую очередь, потому, что никто не знал, где найти обоснование другого рода. Только постепенно, под неотразимым давлением фактов, развилось новое обоснование физики — физика поля.

Еще со времен Ньютона теорию дальностей всегда считали искусственной. Прилагались усилия объяснить гравитацию кинетически, т. е. на основе сил соударения между гипотетическими материальными частицами. Но эти попытки были поверхностными и ничего не дали. Была также выявлена странная роль, которую играло пространство (или инерциальная система) в обосновании механики; особенно четко ее критиковал Эрнст Мах.

Великая перемена была осуществлена Фарадеем, Максвеллом и Герцем, правда, несколько неосознанно и против их воли. Всю свою жизнь все трое считали себя сторонниками механической теории. Герц нашел простейшую форму уравнений электромагнитного поля и заявил, что любая теория, ведущая к этим уравнениям, является теорией типа максвелловской. Но к концу своей короткой жизни он написал работу, где представил в качестве основы физики механическую теорию, свободную от понятия силы.

Нам, которые впитали идеи Фарадея, так сказать, с молоком матери, трудно оценить их величие и смелость. Благодаря своему безошибочному инстинкту Фарадей хорошо понимал, насколько искусственны все попытки сведения электромагнитных явлений к взаимодействию на расстоянии электрических частиц. Каким образом каждое зерно в металлических опилках, разбросанных на листе бумаги, могло знать об электрических частицах, циркулирующих в близлежащем проводнике? Казалось, что все эти электрические частицы, взятые вместе, создают в окружающем пространстве определенное состояние, которое, в свою очередь, производит определенное упорядочение в опилках. Эти состояния пространства,

сегодня называемые полями, могли, по мнению Фарадея, объяснить таинственные электромагнитные взаимодействия, как только удалось бы понять их геометрическую структуру и взаимное воздействие. Он представлял себе эти поля как состояния механического натяжения среды, заполняющей пространство, подобно состояниям натяжения в упруго-растянутом теле. В то время это был единственный способ представления состояний, казавшихся непрерывно распределенными в пространстве. Особый характер механической интерпретации этих полей оставался на втором плане — своего рода успокоение научной совести перед лицом механической традиции времен Фарадея. С помощью этих концепций поля Фарадея удалось дать качественное представление всего комплекса электромагнитных эффектов, открытых им и его предшественниками. Формулировка точных пространственно-временных законов этих полей была делом Максвелла. Вообразите себе охватившие его чувства, когда полученные им дифференциальные уравнения показали, что электромагнитные поля распространяются в виде поляризованных волн со скоростью света. Мало кому из людей в мире довелось испытать такое! В этот радостный момент он, безусловно, не подозревал, что таинственная природа света, казавшаяся полностью выясненной, будет приводить в замешательство еще и последующие поколения. Между тем физикам понадобилось несколько десятилетий, чтобы понять все значение открытия Максвелла; настолько дерзким был вызванный его гением скачок вперед по сравнению с концепциями его современников. Сопротивление новой теории было сломлено только после того, как Герц экспериментально доказал существование максвелловских электромагнитных волн.

Но если электромагнитное поле может существовать как волна, независимо от материального источника, то электростатическое взаимодействие уже не может быть объяснено действием на расстоянии. А то, что было верно для электрического действия, не могло не быть верным и для гравитации. Поэтому ньютоновское дальное действие уступило место полям, распространяющимся с конечной скоростью.

Из всего ньютоновского фундамента теперь оставались только материальные точки, подчиняющиеся закону движения. Но Дж. Дж. Томсон показал, что, согласно теории Максвелла, находящееся в движении электрически заряженное тело обладает магнитным полем, энергия которого проявляется точно так же, как если бы возросла кинетическая энергия тела. Если, таким образом, часть кинетической энергии представляет собой энергию поля, то нельзя было бы утверждать это о всей кинетической энергии? Может быть, основное свойство материи, ее инерция, объясняется с помощью теории поля? Вопрос привел к задаче толкования материи в терминах теории поля; решение ее должно объяснить атомистическую структуру материи. Но вскоре выяснилось, что теория

Максвелла не в состоянии выполнить эту программу. С тех пор многие ученые с большим рвением пытались дополнить теорию поля некоторым обобщением, которое содержало бы теорию материи; но до сих пор эти попытки не увенчались успехом. Для построения теории недостаточно иметь ясное понятие о цели. Необходимо также иметь определенную формальную точку зрения, которая в достаточной степени ограничивала бы бесконечное разнообразие возможностей. Пока она не найдена; следовательно, теории поля не удалось дать основу для всей физики.

Несколько десятилетий большинство ученых думали, что для теории Максвелла можно найти некоторую механическую подоснову. Но мало удовлетворяющие результаты их усилий заставили постепенно принять новую концепцию поля в качестве несводимых основных принципов, другими словами, физики смирились с отказом от идеи механического обоснования.

Таким образом, физики стали придерживаться программы теории поля. Но она не могла считаться обоснованием, потому что никто не мог сказать, сможет ли последовательная теория поля когда-нибудь объяснить, с одной стороны, гравитацию, и, с другой стороны, элементарные составляющие материи. При таком положении вещей было необходимо представлять материальные частицы, как подчиняющиеся законам движения Ньютона. Именно так поступил Лоренц, создавая свою электронную теорию и теорию электромагнитных явлений в движущихся телах.

В таком состоянии находился вопрос об основных понятиях в начале нашего века. Был достигнут колоссальный прогресс в теоретическом понимании целых групп новых явлений, но установление единой основы для всей физики казалось делом далекого будущего. И это положение вещей усугубилось последующим развитием. В нашем веке развитие определяется двумя теоретическими системами, существенно независимыми друг от друга: теорией относительности и теорией квант. Эти две теории прямо не противоречат друг другу, но они кажутся мало приспособленными для объединения в единую теорию. Мы должны коротко обсудить основную идею этих двух систем.

Теория относительности зародилась из попыток усовершенствовать, исходя из экономии мысли, существовавшее в начале века обоснование физики. Так называемая частная теория относительности основывается на том факте, что уравнения Максвелла (а следовательно, и закон распространения света в пустоте) инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца. К этому формальному свойству уравнений Максвелла добавляется достоверное знание нами того эмпирического факта, что законы физики одинаковы во всех инерциальных системах. Отсюда вытекает, что переход от одной инерциальной системы к другой должен управляться преобразованиями Лоренца, применяемыми к пространственно-временным координатам. Следовательно, содержание

частной теории относительности может быть резюмировано одним предложением: все законы природы должны быть так определены, чтобы они были ковариантными относительно преобразований Лоренца. Отсюда вытекает, что одновременность двух пространственно-удаленных событий не является инвариантным понятием, а размеры твердых тел и ход часов зависят от их состояния движения. Другим следствием является видоизменение закона Ньютона в случае, когда скорость заданного тела не мала по сравнению со скоростью света. Между прочим, отсюда вытекал принцип эквивалентности массы и энергии, а законы сохранения массы и энергии объединились в один-единственный закон. Но раз было доказано, что одновременность относительна и зависит от системы отсчета, исчезла всякая возможность сохранить в основах физики дальное действие, ибо это понятие предполагало абсолютный характер одновременности (должна существовать возможность констатации положения двух взаимодействующих материальных точек «в один и тот же момент»).

Общая теория относительности обязана своим происхождением попытке объяснить известный еще со времен Галилея и Ньютона, но не поддающийся никакой теоретической интерпретации факт: два совершенно отличных друг от друга свойства, инертность и тяжесть, измеряются одной и той же константой — массой. Из этого соответствия следует, что экспериментально невозможно установить, движется ли заданная система координат ускоренно или она движется равномерно-прямолинейно, а наблюдаемые эффекты обусловлены полем тяготения (в этом и состоит принцип эквивалентности общей теории относительности). Введение гравитации разбило понятие об инерциальной системе. Здесь удобно заметить, что инерциальная система является слабым местом механики Галилея — Ньютона, ибо физическому пространству приписывалось некоторое таинственное свойство, обуславливающее вид системы координат, для которой справедливы закон инерции и ньютоновский закон движения.

Этих трудностей можно избежать с помощью следующего постулата: законы природы должны формулироваться так, чтобы их форма оставалась идентичной для систем координат при любом состоянии их движения. В этом состоит задача общей теории относительности. С другой стороны, из частной теории относительности мы вывели существование в пространственно-временном континууме римановой метрики, которая, в соответствии с принципом эквивалентности, описывает и гравитационное поле, и метрические свойства пространства. Предполагая, что уравнения гравитационного поля являются дифференциальными уравнениями второго порядка, мы четко определяем закон поля.

Наряду с этим теория освободила физику поля от неспособности (ею она страдала наравне с ньютоновской механикой) приписывать пространству те независимые физические свойства, которые

раньше заслонялись применением инерциальной системы. Но нельзя претендовать на то, что те части общей теории относительности, которые сегодня можно считать завершенными, снабдили физику полным и удовлетворительным фундаментом. Во-первых, полное поле кажется состоящим из двух логически несвязанных частей: гравитация и электромагнетизм. Во-вторых, эта теория, подобно прежним теориям поля, до сих пор не дала объяснение атомистической структуре материи. Эта неудача связана, очевидно, с тем, что она до сих пор ничем не способствовала пониманию квантовых явлений. Чтобы понять эти явления, физики вынуждены принять совершенно новые методы, основную характеристику которых мы сейчас рассмотрим.

В 1900 г. в ходе чисто теоретического исследования Планк сделал замечательное открытие: закон теплового излучения тел не может быть выведен только из законов электродинамики Максвелла. Чтобы прийти к результатам, согласующимся с опытами, о которых идет речь, излучение заданной частоты должно трактоваться, как состоящее из отдельных атомов энергии $h\nu$, где h — универсальная постоянная Планка, ν — частота. В последующие годы было доказано, что свет всегда излучается и поглощается такими квантами энергии. В частности, Нильс Бор сумел понять строение атома, предполагая, что атомы могут обладать только дискретными значениями энергии и что скачкообразные переходы между этими значениями связаны с излучением и поглощением такого кванта энергии. Это пролило некоторый свет на то обстоятельство, что в газообразном состоянии элементы и их составляющие излучают и поглощают свет только совершенно определенных частот. Все это было абсолютно необъяснимо в рамках существовавших теорий. Стало ясно, что в атомных явлениях, по крайней мере, характер всего происходящего определяется дискретными состояниями и скачкообразными, по-видимому, переходами между ними, причем постоянная Планка играет решающую роль.

Следующий шаг был сделан Л. де Бройлем. Он поставил вопрос о возможности понимания дискретных состояний с помощью привычных понятий и угадал аналогию со стоячими волнами, которые встречаются, например, для собственных частот органических труб и струн в акустике. Конечно, требуемые здесь волновые процессы не были известны, но их можно было построить, а их математические законы можно было формулировать, используя постоянную Планка h . Де Бройль представил себе, что с вращающимся вокруг атомного ядра электроном связан цуг таких гипотетических волн и в определенной степени объяснил дискретный характер «разрешенных» боровских орбит стационарным характером соответствующих волн.

Однако в механике движение материальных точек определяется силами или полями сил, действующих на эти точки. Следовало ожидать, что эти поля сил будут аналогичным образом оказывать

влияние на волновые поля де Бройля. Эрвин Шредингер показал, как можно учесть это влияние, предложив искусный метод новой интерпретации некоторых формул классической механики. Ему удалось также настолько расширить теорию волновой механики, что она могла применяться к любой механической системе, состоящей из произвольного числа материальных точек, т. е. обладающей произвольным числом степеней свободы. Это было возможно потому, что механическая система, состоящая из n материальных точек, в значительной мере математически эквивалентна одной материальной точке, движущейся в пространстве $3n$ измерений.

На основе этой теории удалось удивительно хорошо представить огромное разнообразие фактов, которые иначе казались совершенно непостижимыми. Но, странная вещь, Шредингера постигла одна неудача: оказалось невозможным ассоциировать с этими волнами определенные движения материальных точек, — а ведь именно в этом состояла первоначальная цель всего построения.

Трудность казалась непреодолимой, пока ее не победил Борн способом столь же простым, сколь и неожиданным. Волновые поля де Бройля — Шредингера не должны были трактоваться как математическое описание реального протекания события во времени и в пространстве, хотя они действительно имеют отношение к такому событию. Они являются скорее математическим описанием того, что мы можем в действительности знать о системе. Они служат только для представления статистических высказываний и предсказаний относительно результатов всех измерений, которые можно произвести над системой.

Проиллюстрируем эти общие черты квантовой механики простым примером: рассмотрим материальную точку, удерживаемую в ограниченной области G силами конечной интенсивности. Если кинетическая энергия материальной точки ниже определенного предела, то, согласно классической механике, она никогда не сможет покинуть область G . Но, согласно квантовой механике, через определенный период, который нельзя непосредственно предсказать, материальная точка способна покинуть область G в непредвиденном направлении и проникнуть в окружающее пространство. Этот случай представляет, по Гамову, упрощенную модель радиоактивного распада.

Квантовая механика следующим образом трактует этот случай: в момент t_0 мы имеем систему шредингеровских волн, полностью заключенных внутри G . Но начиная с момента времени t_0 , волны покидают G по всем направлениям, так что амплитуда выходящих волн мала по сравнению с начальной амплитудой системы волн внутри G . Чем дальше распространяются внешние волны, тем сильнее уменьшается амплитуда волн внутри G , а в соответствии с этим и амплитуда последующих волн, покидающих G . Только через бесконечное время запас волн внутри G исчерпается, тогда как внешняя волна охватит все большее пространство. Но какое

отношение имеет этот волновой процесс к вопросу, который нас интересовал прежде всего — с частицей первоначально заключенной в G ? Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны вообразить себе некоторое устройство, позволяющее производить измерения над частицей. Вообразим себе, например, где-то в окружающем пространстве такого рода экран, что входя с ним в контакт, частица останавливается. По интенсивности волн, ударяющихся в экран в некоторой точке, мы можем делать заключения о вероятности удара частицы с экраном в этой точке в данный момент времени. Как только частица ударилась в какую-нибудь определенную точку экрана, все волновое поле теряет весь свой смысл; его единственным назначением было сделать вероятностные предсказания относительно места и времени удара частицы об экран (или, например, относительно величины количества движения частицы в момент удара об экран).

Все остальные случаи аналогичны. Целью теории является определение вероятности результатов измерений в системе в заданный момент времени. С другой стороны, она не пытается дать математическое представление того, что действительно имеет место, или того, что происходит в пространстве и во времени. В этом пункте современная квантовая теория радикально отличается от всех предшествующих физических теорий как механических, так и полевых. Вместо того чтобы дать модель для изображения реальных пространственно-временных событий, она дает распределения вероятности для возможных измерений как функций времени.

Надо признать, что новая теоретическая концепция обязана своим происхождением не взлету фантазии, а непреодолимой силе опытных фактов. Все попытки представить частицу и волновые свойства, проявляющиеся в явлениях, связанных со светом и веществом, непосредственно пространственно-временной моделью, до сих пор кончались неудачно. Как убедительно показал Гейзенберг, всякое утверждение о строго детерминистической структуре природы с эмпирической точки зрения окончательно исключается из-за атомистического строения приборов, применяемых в наших экспериментах. Очевидно, никакое будущее познание не сможет заставить физиков отказаться от нашего современного статистического теоретического обоснования физики в пользу детерминистского обоснования, которое изучало бы непосредственно физическую реальность. Логически проблема дает, по-видимому, две возможности, из которых мы, в принципе, можем избрать одну. В конце концов выбор будет определен тем, какое описание позволит формулировать логически простейшее обоснование. В настоящее время мы не владем детерминистской теорией, которая позволяла бы описывать события как таковые и в согласии с реальными фактами.

Пока мы должны признать, что не имеем для физики общей теоретической основы, которую можно было бы считать ее логическим фундаментом. Теория поля до сих пор терпела неудачи в мо-

лекулярной области. Всеми признано, что единственный принцип, который мог бы служить основой для квантовой теории, может быть получен переводом теории поля на схему квантовой статистики. Но никто не отважится сказать, когда это действительно будет сделано удовлетворительным образом.

Некоторые физики, в том числе и я сам, не могут поверить, что мы раз и навсегда должны отказаться от идеи прямого изображения физической реальности в пространстве и времени или что мы должны согласиться с мнением, будто явления в природе подобны игре случая. Каждому дозволено выбрать направление приложения своих усилий, и каждый человек может найти утешение в прекрасном изречении Лессинга, что поиск истины значительно ценнее, чем обладание ею.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПОНЯТИЯХ¹

Хочу предпослать работе², написанной нами для этого сборника совместно с госпожой Б. Кауфман, несколько слов на том единственном языке³, на котором я свободно выражаюсь. Это слова извинения. Они объяснят, почему, восхищенно восприняв еще в сравнительно молодые годы выдающееся открытие де Бройля о тесной связи между квантовыми и резонансными состояниями, я тем не менее беспрестанно искал другой путь для решения квантовой загадки или по крайней мере для оказания помощи в подготовке этого решения. Эти поиски обусловлены глубокой, принципиального характера неприязнью, которую мне внушают основы статистической квантовой теории. При этом я совершенно точно знаю, что де Бройль сам не чужд такого чувства. Это ясно вытекает из предпринятых им в 20-х годах попыток такого дополнения волновой квантовой теории, чтобы в рамках понятий классической механики (материальная точка, потенциальная энергия) она давала полное описание конфигурации системы в зависимости от времени. Эта идея была высказана недавно Д. Бомом, не знавшим о работах де Бройля (теория волны — пилота).

Я не сомневаюсь, что современная квантовая теория (вернее «квантовая механика») согласуется с опытом лучше любой другой теории, в которой элементарными понятиями служат материальная точка и потенциальная энергия. Неудовлетворительным в теории я нахожу не это, а ту интерпретацию, которую она дает

¹ В кн.: «Louis de Broglie. Physicien et penseur» (раздел «Интерпретация волновой механики»). — *Прим. ред.*

² Речь идет о работе А. Эйнштейна и Б. Кауфман «О современном состоянии общей теории гравитации», опубликованной в том же сборнике в разделе «Различные мемуары», стр. 321—336. — *Прим. ред.*

³ В сборнике статья напечатана на немецком языке и во французском переводе. — *Прим. ред.*

« ψ -функции». Во всяком случае, в основе моей концепции лежит тезис, решительно отвергаемый большинством теоретиков.

Существует некоторое независимое от любых наблюдений или измерений «реальное состояние» физической системы, которое в принципе может быть описано принятыми в физике способами выражения. [Какие при этом применимы адекватные способы выражения и соответствующие понятия, на мой взгляд, пока не известно (Материальные точки? Поля? Способы выражения, которые еще предстоит найти?). Этот тезис о реальности не имеет смысла внутренне ясного утверждения; он обладает, собственно, лишь программным характером. Но все люди, в том числе теоретики-квантовики, придерживаются этого тезиса о реальности до тех пор, пока речь не идет об основах квантовой теории. Никто, например, не сомневается, что даже в отсутствие действительного или потенциального наблюдателя центр тяжести Луны в определенный момент времени занимает определенное положение. Если отказаться от этого произвольного тезиса, рассмотренного чисто логически, то избежать солипсизма становится очень трудно. В указанном смысле я не стесняюсь сделать понятие «реальное состояние системы» центральным пунктом своих рассуждений.

Нет никакого сомнения, что ψ -функция является способом описания «реального состояния». Вопрос состоит в том, характеризуется ли реальное состояние при таком описании полностью, или нет. Ответ на этот вопрос порождает трудности. Первое предположение: описание полное. Тогда свободно парящее в пространстве тело будет занимать тем менее определенное положение (относительно инерциальной системы), чем большее время оно, будучи предоставлено самому себе, меняется в соответствии с уравнением Шредингера. Но последующее наблюдение с помощью света указывает на некоторое квазиопределенное положение. Если описание системы ψ -функцией было бы полным, то оказалось бы, что квазиопределенное положение является следствием наблюдения и не существовало до этого. Такое заключение интуитивно неприемлемо, если речь идет не об электроны или атоме, а о макроскопическом теле (тот факт, что для тела значительной массы образование обширной расплывчатой конфигурации требует длительного времени, здесь не может помочь, потому что это время не так уж значительно для тел, еще видимых в микроскоп). Вместе с тем из смысла теории не вытекает, что в начальный момент конфигурация *должна быть* квазиопределенной.

Поэтому мы вынуждены считать, что описание системы с помощью ψ -функции не является полным описанием реальных состояний. Имеются и другие соображения, ведущие к этому заключению. Дело в том, что аппарат квантовой теории так построен, что ψ -функция одной из двух подсистем, составляющих общую систему, зависит от характера измерений, произведенных над другой подсистемой. Это действительно и тогда, когда в момент

измерения обе подсистемы пространственно разделены. Если бы ψ -функция полностью описывала реальное состояние, то отсюда вытекало бы, что измерение, произведенное над второй системой, влияло бы на реальное состояние первой. Это соответствовало бы некоторой мгновенной связи между пространственно разделенными объектами. Этот случай также отвергается интуицией. Таким образом, приходим к выводу, что описание состояния ψ -функцией нужно считать неполным.

Второе предположение: описание с помощью ψ -функции не является полным. Тогда мы вынуждены допустить, что должно существовать некоторое более полное описание, а также, что в законы природы должны входить данные полного, а не частичного описания. Дальше трудно уклониться от вывода, что статистический характер теории обусловлен неполнотой описания и ничего не имеет общего с состоянием вещей, как таковыми.

Подобные рассуждения могли сыграть определенную роль при построении «теории волны-пилота»; во всяком случае эта теория избегает вышеуказанных трудностей. Л. де Бройль сам недавно указал причину, почему он отказался от этого пути. Мне кажется, что статистическая квантовая теория также неспособна дать удовлетворительную основу для изложения полной теории, как, например, основанная на классической механике и законе осмотического давления теория броуновского движения была бы неспособна дать основу для изложения молекулярно-кинетической теории, если теория броуновского движения предшествовала бы во времени молекулярно-кинетической.

Это мнение подкрепляется следующими соображениями. Статистическая квантовая механика частично обязана своим возникновением тому обстоятельству, что как угодно малые воздействия могут вызвать конечные изменения состояния системы. Эффект Комптона, например, показывает, что цуг воли как угодно малой амплитуды и конечной притяженности может передать электрону определенную конечную энергию. Дело обстоит так, будто слабое поле может вызвать не прямой переход конечной энергии, а только небольшую вероятность такого перехода. Но чтобы принять вероятность какого-либо изменения за истинное изменение состояния электрона, нужно представить себе «квантовое состояние», которое образуется суперпозицией единичных состояний электронов с различной энергией, причем каждому единичному состоянию соответствует определенная амплитуда вероятности. Таким образом, появляется возможность действию слабого поля ставить в соответствие небольшое изменение амплитуд вероятности, т. е. «состояния», и этим свести прерывистый ход изменения, происходящего с конечной скоростью, к непрерывному изменению амплитуд вероятности.

Цена, которую надо заплатить за возможность такого сведения, — это допущение реальных состояний, образованных беско-

нечно большим числом состояний с различной энергией. Необходимость этой жертвы вызвана тем, что физическая природа воздействия (здесь слабое и ограниченное волновое поле) представляется известной. Это связано с сохранением в квантовой теории классического понятия силы и, соответственно, потенциальной энергии; только закон движения заменяется чем-то совершенно новым. Совершенство математического аппарата теории и значительность добытых ею результатов отвлекают нас от жестокости жертвы.

Но в конце концов, как мне кажется, будет признано, что действующую силу и, соответственно, потенциальную энергию (или волновое поле при эффекте Комптона) необходимо заменить чем-то, имеющим атомистическую структуру в том же смысле, как и сам электрон. Тогда вообще не будет «слабых полей» и, соответственно, сил как действующих причин и тем более смешанных состояний.

Еще последнее замечание: мои попытки дополнить общую теорию относительности путем обобщения уравнений гравитации частично обязаны своим происхождением предположению, что разумная общая релятивистская теория поля даст, возможно, ключ к совершенной квантовой теории. Это скромная надежда, а не убеждение. Имеются серьезные возражения против мнения, что атомистический характер реальности в самом деле может быть удовлетворительно описан дифференциальными уравнениями (теорией поля). Эти соображения, насколько я могу судить, не являются решающими, и до сих пор нет другого пути для формулировки обобщенных релятивистских законов.

ПРЕДШЕСТВЕННИКИ И СОВРЕМЕННОКИ

МАКС ПЛАНК КАК ИССЛЕДОВАТЕЛЬ

На 1913—1914 учебный год бразды правления ректоратом Берлинского университета были вручены физику-теоретику Макс Планку. Все мы, его благодарные товарищи по работе, как близкие, так и более далекие, хотим воспользоваться этим случаем, чтобы порадоваться тем достижениям, которыми наука ему обязана.

Первой самостоятельной работой Макса Планка была его диссертация «О втором законе механической теории тепла», которую он в 1879 г. в возрасте 21 года представил Мюнхенскому университету. Характерно, что Планк начал свою деятельность в качестве публициста с обсуждения весьма общей темы, переходя в последующие годы к разработке частных вопросов, непосредственно вытекающих из первого исследования. Это характерно для всей манеры работы Планка, а возможно, вообще для метода, используемого чистыми теоретиками. Они всегда исходят из некоторого наиболее общего положения, выводят из него отдельные частные результаты и затем сравнивают их с опытом.

Первым крупным научным достижением Планка является третья из серии статей, названных «О принципе возрастания энтропии» (Wied. Ann., Bd. 32, 1887, S. 462). В этой статье рассматривается общая теория химического равновесия, особенно в ее применении к разбавленным растворам. Правда, общие результаты исследования этого вопроса были получены более чем за десять лет до этого Гиббсом, а по отношению к разбавленным растворам — частично Вант-Гоффом. Но работы Гиббса были малоизвестными и труднодоступными. Достижением можно считать уже сам факт признания их ценности; я думаю даже, что Планк не дошел бы до понимания работ Гиббса, не пройди он самостоятельно подобный же путь. Большая ценность указанной работы Планка заключается в том, что он установил для равновесия

разбавленных растворов несколько формул такой общности, что в них заключаются все выводимые термодинамически закономерности этих растворов. На основании своих общих формул Планк первым, еще до Аррениуса, пришел к выводу, что в водных растворах с «аномально» повышенным давлением паров (соответственно пониженной точкой замерзания или повышенной точкой кипения) растворенное вещество должно быть диссоциировано. Так называемый оствальдовский закон разбавления для бинарных электролитов содержится в общих формулах Планка как весьма частный случай.

О рассмотренных в указанной работе Планка частных термодинамических вопросах мы здесь не будем говорить. Зато мы не должны пропустить появившуюся в 1896 г. в *Wied. Ann.*, Bd. 56 полемическую работу «Против новой энергетики», ибо она несомненно оказала на работающих в этой области значительное влияние. Она представляет собой мастерски написанную краткую заметку, в которой показано, что энергетика, как эвристический метод, ничего не стоит и даже, что она оперирует несостоятельными понятиями. Для каждого сторонника подлинно научного мышления чтение этой свежо написанной заметки является вознаграждением за ту досаду, которую он испытывал, читая те работы, против которых в ней ведется борьба.

В 1896 г. Планк занялся теорией излучения. Общеизвестно, что его работы в этой области оказали огромное влияние на последующее развитие физики. Без этих работ были бы невозможны большие успехи, достигнутые за последние годы учением о теплоте. Из этих работ вырос тот обширный комплекс результатов, теоретических представлений и вновь возникающих проблем, который всплывает перед физиком при упоминании слова «кванты», одновременно оживляя и затрудняя его существование. Чтобы оценить достижения Планка в этой области, нужно хотя бы бегло рассмотреть развитие теории излучения.

Каждое тело излучает тепло. Вследствие этого любая имеющаяся в непрозрачном теле полость постоянно заполняется тепловым излучением. В шестидесятих годах прошлого столетия Кирхгоф установил из простых термодинамических соображений, что это излучение должно быть одинаковым по всем направлениям, а его свойства зависят только от температуры тел, обхватывающих полость. Обозначим

$$u dv$$

энергию излучения для интервала частот dv в единице объема. Тогда u (монохроматическая плотность излучения) зависит только от абсолютной температуры T и частоты ν , и она совершенно независима от физической и химической природы стенок полости. $u(\nu, T)$ является, как принято выражаться, универсальной функцией двух переменных ν и T ; ее определение составляет

одну из важнейших экспериментальных и теоретических задач учения об излучении. В рамках чистой термодинамики об этой функции ничего нельзя узнать.

Следующий шаг в теории был сделан в 1884 г. Больцманом, показавшим, что для суммарной плотности излучения закон

$$\int_0^\infty u dv = \sigma T^4$$

может быть выведен термодинамически, если принять за основу полученный Максвеллом из электромагнитной теории закон о давлении излучения. Согласно этому закону, отраженное, поглощенное и выделенное поверхностью излучение оказывает на эту поверхность определенное давление. Закон Больцмана позволяет найти плотность суммарного излучения, но он ничего не говорит о спектральном распределении в излучении. В 1893 г. появилась важная работа В. Вина, в которой убедительно доказано, что излучение полости определенной температуры T_1 может быть переведено в излучение другой температуры T_2 путем адиабатического сжатия или, соответственно, расширения излучения между зеркальными стенками. Отсюда Вин смог бы определить теоретически функцию u для всех температур, если бы ее зависимость от частоты ν была бы определена хотя бы для одной температуры. Неизвестная функция двух переменных свелась, таким образом, к неизвестной функции одной единственной переменной. Полученный Вином результат (закон смещения) выражается формулой

$$u = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right),$$

где f — неизвестная универсальная функция одной переменной.

Если можно было бы положить на весы все мозговое вещество, которое физики пожертвовали на алтарь этой универсальной функции, то получилась бы величественная картина, и этому жестокому жертвованию не видно конца! Больше того: жертвой ее пала и классическая механика, причем нельзя предвидеть, сумеют ли максвелловские уравнения электродинамики пережить кризис, вызванный этой функцией f .

Единственным, кому усилия в теоретическом определении и понимании функции f принесли успех, был Планк. Он исследовал нерегулярные колебания электрического резонатора с собственной частотой ν_0 в поле излучения, пользуясь законами механики и максвелловской электродинамики. При этом он нашел простое соотношение между средней энергией U колебания резонаторов и монохроматической плотностью излучения, соответствующей частоте ν_0 . Задача излучения была бы, таким образом, разрешена, если бы удалось выразить энергию U резонаторов или, вернее, системы очень большого числа резонаторов как функцию темпе-

ратуры. Метод, которым Планк в своей прокладывающей новые пути работе 1901 г. наконец решил эту задачу, настолько же рискован, насколько и гениален. Он исходил из установленной Больцманом в теории газов теоремы, согласно которой энтропия S состояния равна умноженному на k логарифму вероятности W этого состояния. Если удалось бы вычислить вероятность, соответствующую определенной энергии монохроматических резонаторов, то можно было бы вычислить энтропию S системы, а отсюда и ее температуру. Этот расчет, который вследствие недостаточно строгого определения W нельзя было провести без известного произвола, привел к формуле излучения

$$u = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

Эта формула до сих пор строго подтверждается опытом, дающим численные значения констант h и k . Громадный триумф, вызванный этой работой, состоит в следующем. Константа k заимствована из известного принципа Больцмана, где она определяется отношением

$$k = \frac{R}{N} = \frac{\text{универсальная газовая постоянная}}{\text{число молекул в граммолекуле}}.$$

Полученная из измерений над излучением величина k дает, следовательно, N , т. е. совершенно точно абсолютную величину молекулы; оказывается, что определенная таким способом величина молекулы находится в удовлетворительном согласии с результатами, полученными в теории газов. С тех пор стали известны опирающиеся на совершенно другую основу точные определения N , блестяще подтвердившие результат Планка.

Но каков смысл второй входящей в формулу излучения Планка константы h ? Чтобы получить пригодную формулу излучения, Планк вынужден был предположить, что энергия системы резонаторов состоит из дискретных квантов энергии величины $h\nu$. Это предположение не согласуется с электродинамикой, т. е. не согласуется даже с первой частью исследования самого Планка. В этом заключается та большая трудность, которая занимает теоретиков уже около восьми лет. Чтобы устранить трудность, Планк в последние годы видоизменил свою теорию. Добился ли он при этом правильных результатов, должно решить будущее.

Во всяком случае, выяснилась не только пригодность самой формулы Планка, но и реальность вспомогательных величин, появившихся при теоретическом рассмотрении вопроса. С одной стороны, при изучении электрооптического эффекта и катодных лучей, испускаемых веществом под воздействием рентгеновского излучения, было установлено, что кванты энергии действительно проявляются при поглощении излучения. С другой стороны, изу-

чение уменьшения удельной теплоемкости твердых тел при низких температурах показало, что зависимость теплоемкости любого тела от температуры соответствует выводам не статистической механики, а планковской теории резонаторов.

Наконец, третья область, в которой Планк добился успеха, — это теория относительности. Тот факт, что теория относительности быстро вызвала большой интерес среди физиков, в значительной степени объясняется теплой и решительной поддержкой, которую ей оказал Планк. Он первым установил релятивистский закон движения материальной точки и показал, что принцип наименьшего действия имеет в теории относительности такое же фундаментальное значение, как и в классической механике. В одном исследовании по динамике системы Планк указал на важную взаимозависимость, связывающую, согласно теории относительности, энергию и инертную массу.

Вспомним, наконец, о его книгах по термодинамике и тепловому излучению — шедеврах физической литературы. В этих книгах, без которых не обходится ни одна библиотека физика, Планк объединил большую часть важнейших результатов своих исследований, сделав их доступными своим коллегам по профессии. То удовольствие, которое испытываешь, когда берешь в руки эти книги, в немалой мере обусловлено простым, поистине художественным стилем, присущим всем работам Планка. При изучении его трудов вообще создается впечатление, что требование художественности является одной из главных пружин его творчества. Ведь недаром рассказывают, что Планк после окончания гимназии сомневался, посвятить ли себя изучению математики и физики или музыки.

Пожелаем же неутомимым стремлениям этого человека к познанию быть плодотворными, оказывать науке и в будущем ценные услуги, особенно в удачном разрешении тех трудностей, которые сегодня возникли перед нами как следствие результатов его же собственных работ.

МАРИАН СМОЛУХОВСКИЙ

5 сентября ушел от нас один из самых проникательных современных теоретиков, Мариан Смолуховский. Он умер, едва достигнув 45 лет, в Кракове во время эпидемии дизентерии.

Круг научных работ Смолуховского сосредоточивался на молекулярной теории теплоты. Особенно его интересовали те следствия из молекулярной кинетики, которые нельзя было понять с точки зрения классической термодинамики; он чувствовал, что, только изучив эти явления, можно будет преодолеть сильное сопротивление, которое оказывали молекулярной теории ученые конца XIX в.

Тот скептический разум, который значительно продвинул электродинамику, очистив ее от ненужных механических образов, одновременно тормозил развитие учения о теплоте. После того как физики поняли, что теория может быть ясной и полной, не будучи основанной на механике, они отказались от механических теорий во всех областях физики. Поэтому понятно, почему Больцман в 1898 г. с печалью писал в предисловии ко второй части «Лекций по теории газов»: «По моему мнению, науке был бы нанесен серьезный урон, если бы из-за господствующих ныне враждебных настроений теория газов была бы предана временному забвению, подобно тому, как это случилось с волновой теорией из-за авторитета Ньютона».

Уже в этом предисловии имелось указание на появившуюся в том же году теоретическую работу Смолуховского о скачке температуры между стенкой и газом при теплопроводности в сильно разреженных газах. Это явление, открытое еще за 23 года до того Варбургом и Кундтом, действительно было сильным аргументом в пользу молекулярной кинетики. Каким образом можно было удовлетворительно объяснить увеличение скачка температуры между стенкой и газом при дальнейшем разрежении газа без

помощи чуждого классическому учению о теплоте понятия свободной длины пробега?

Но чтобы изменить мнение противников, нужны были еще более убедительные доказательства. Существование скачка температуры вряд ли можно было понять без кинетической теории, но реальность теплового движения еще не вытекала непосредственно из этого явления. Кинетической теории теплоты удалось добиться общего признания лишь в 1905—1906 гг., когда было доказано, что она может количественно объяснить давно открытое хаотическое движение взвешенных в жидкости микроскопических частиц, т. е. броуновское движение. Смолуховский создал особенно изящную и наглядную теорию этого явления, исходя из кинетического закона равномерного распределения энергии. Согласно этому закону, частица диаметром в 1 мкм (при плотности воды) должна двигаться в жидкости, находящейся в термодинамическом равновесии с мгновенной скоростью в среднем около 3 мм/сек. Показав, что внутреннее трение постоянно уничтожает эту скорость, а неупорядоченные соударения восстанавливают ее, Смолуховскому удалось дать количественное объяснение явления.

Познание сущности броуновского движения привело к внезапному исчезновению всяких сомнений в достоверности больцмановского понимания термодинамических законов. Стало ясно, что термодинамическое равновесие в точном смысле слова вообще не существует, что скорее каждая предоставленная надолго самой себе система совершает беспорядочные колебания вокруг состояния идеального термодинамического равновесия. Тем не менее, как показывает общая теория, поскольку эти колебания ограничены, они в целом ускользают от наблюдения. Но в 1908 г. Смолуховскому удалось пайти вторую группу наблюдаемых явлений, в которых эти колебания проявляются почти непосредственно. Это опалесценция газов и жидкостей в критическом состоянии. Чем больше сжимаемость вещества или отдельной составной части этого вещества, тем больше непрерывные пространственно-временные флуктуации, испытываемые плотностью вследствие хаотичности теплового движения; на основе общей теории Смолуховский определил, что эти флуктуации должны привести к оптическому помутнению вещества. Голубой цвет неба, объяснение которому дал лорд Рэлей, также принадлежит к этой группе явлений, доказывая существование пространственных флуктуаций плотности воздуха.

Остальные научные работы Смолуховского нельзя здесь рассматривать в отдельности. Но нужно напомнить о двух циклах докладов, которые он прочитал в 1913 и 1916 гг. по приглашению Королевского научного общества в Геттингене и которые были опубликованы в журнале «Physikalische Zeitschrift». Они дают хороший обзор деятельности этого, так рано нас покинувшего ученого на протяжении всей его жизни. Каждый, кто лично близко

знал Смолуховского, любил в нем не только остроумного ученого, но и благородного, тонкого и благожелательного человека. Мировая катастрофа последних лет возбудила в нем чувство неопишущей боли за жестокость людей и за ущерб, причиненный нашему культурному развитию. Судьба слишком рано оборвала его благодатную деятельность в качестве ученого и учителя; но мы будем высоко ценить пример его жизни и его труды.

ЭМИЛЬ ВАРБУРГ КАК ИССЛЕДОВАТЕЛЬ

В апреле этого года отошел от руководства государственным физико-техническим институтом Эмиль Варбург, разносторонне одаренный человек неиссякающей энергии, плодотворно содействовавший развитию физики на протяжении последних 55 лет. Оправдано ли выделение истории отдельной личности из органически единого здания науки, из картины его целостного развития? Не связана ли его деятельность настолько тесно с работой предшественников и современников, что следует считать случайностью совершение решающего шага тем или другим индивидуумом? Содержание науки можно постигать и анализировать, не вдаваясь в рассмотрение индивидуального развития ее создателей. Но при таком односторонне-объективном изложении отдельные шаги иногда могут казаться случайными удачами. Понимание того, как стали возможными и даже необходимыми эти шаги, достигается лишь, если проследить за умственным развитием индивидуумов, содействовавших выявлению направления этих шагов. Исходя из этого, попытаемся сделать обзор работ одного из наших современников. При этом мы вынуждены ограничиваться только тем, что сегодня представляется особенно важным. Лежащие передо мной четыре объемистых тома оригинальных работ Варбурга касаются различных вопросов физики, не поддающихся необходимому для обзора непринужденному объединению с единой точки зрения. Поэтому в конце данной статьи помещен снабженный отчасти краткими указаниями список работ¹, который облегчит специалисту использование обширных результатов работ Варбурга.

Первые работы Варбурга (в том числе латинская диссертация 1868 г.) посвящены теоретическому и экспериментальному

¹ В данном издании список опущен. — Прим. ред.

изучению механики акустических колебаний (колебание стержней, определение скорости звука в мягких телах путем их соединения с системами, совершающими почти незатухающие колебания; обратимые периодические изменения намагниченности железных стержней вследствие колебательных деформаций; нагревание звуковыми колебаниями; затухание тонов в твердых телах из-за внутренних сопротивлений).

В 1870 г. экспериментами над вытеканием ртути из капиллярной трубки Варбург показал, что между ртутью и стеклом нет заметного скольжения. Эта работа послужила Варбургу и А. Кундту естественной отправной точкой для важного совместного исследования, представленного Гельмгольцем в 1875 г. Берлинской академии наук («О трении и теплопроводности разреженных газов»). В то время как в текущей жидкости нет заметного скольжения слоев, прилегающих непосредственно к стенке, кинетическая теория утверждает существование скольжения газов в случае, когда нельзя практически пренебрегать длиной свободного пробега молекул газа по сравнению с размерами рассматриваемого сосуда. Из теории вытекает, что у стенки имеется определенная скорость течения газа на расстоянии до $0,7 \lambda$ (λ — длина свободного пробега в газе).

Следовательно, у стенки происходит неравномерное изменение скорости течения, тем большее, чем больше длина пробега, т. е. меньше плотность газа.

Объяснение этого явления просто. Находящиеся в тепловом движении молекулы до соударения со стенкой сталкиваются между собой в более глубоком слое, следовательно они обладают средней поступательной скоростью (течением), направленной параллельно стенке сосуда. После удара об стенку они теряют эту скорость. Значит, находящиеся около неподвижной стенки молекулы имеют в среднем отличную от нуля скорость течения (кажущееся скольжение).

Совершенно аналогичным рассуждением можно показать, что если существует перпендикулярное стенке падение температуры, то между стенкой и газом имеется скачок температуры. Температура газа у стенки должна быть такой же, какой она была бы на расстоянии $0,7 \lambda$ от стенки в отсутствие скачка.

Существование обоих эффектов было доказано экспериментально Кундтом и Варбургом. Это был важный аргумент в пользу того, что кинетическая теория газов соответствует действительности. Это был первый случай, когда на основе молекулярной теории тепла было предсказано новое явление, причем явление, которое нельзя было объяснить с точки зрения континуального понимания материи. Если в конце XIX в. энергетики по достоинству оценили бы эти аргументы, то вряд ли они бы решились серьезно ставить под сомнение глубокие основания молекулярной теории.

Годом позже оба автора нашли еще одно важнейшее экспериментальное подтверждение кинетической теории газов. Они показали, что молекулярная теплоемкость паров ртути равна $\frac{3}{2} R$ (R — газовая постоянная).

Если одноатомные молекулы газа не обладают энергией вращения, т. е. ведут себя как материальные точки, то общая тепловая энергия газа обусловлена только поступательным движением его молекул, а оно, со своей стороны, при заданном объеме однозначно определяет давление. Этому соответствует уравнение

$$\text{тепловая энергия} = \frac{3}{2} pV = \frac{3}{2} RT.$$

Подтверждение было получено путем измерения скорости звука по методу Кундта.

Экспериментальные исследования последующих лет (1872—1879) были посвящены изучению внешнего трения и особенно изучению упругих свойств твердых тел, деформированных выше предела упругости. Аналогия с этими работами привела Варбурга к одному из красивейших результатов его творчества, а именно к доказательству, что циклическое намагничивание ферромагнитных веществ связано с потерей механической, соответственно электромагнитной, энергии, которая проявляется в гистерезисной теплоте (1881 г.). Он нашел тогда и количественную связь этой потери энергии с площадью кривой гистерезиса. Варбург рассчитал потенциальную энергию постоянного магнита для железного образца

$$\Phi = + \int dV \left(I_x \frac{d\varphi}{dx} + I_y \frac{d\varphi}{dy} + I_z \frac{d\varphi}{dz} \right) = - \int (I h) dV,$$

где I — намагниченность, φ — потенциал постоянного магнита, V — элемент объема железного образца. Отсюда следует, что механическая работа dA , совершаемая при бесконечно малом перемещении постоянного магнита, равна приращению $d\varphi$ потенциала φ при постоянном I :

$$dA = -d\Phi_I = - \int (I dh) dV.$$

Следовательно, при перемещении единицы объема железа совершается механическая работа

$$A = - \int I dh,$$

где вектор I теперь необходимо рассматривать как функцию вектора h . Сейчас мы привыкли писать

$$A = + \int h dI,$$

что, конечно, для замкнутого цикла намагничивания сводится к тому же.

Так как кинетическая теория дала для газов столь значительные результаты, стал очень интересным вопрос о том, насколько далеко эти теоретические представления подтверждаются для сильно сжатых газов. Для выяснения этого вопроса Варбург и Бабо (1882 г.) проверили одно из наиболее примечательных, оправданных опытом следствий этой теории, а именно независимость коэффициента трения от плотности. Опыт проводился с углекислотой при высоких плотностях. Оказалось, что с увеличением плотности коэффициент вязкости возрастает, но не более чем на 9% при повышении плотности в 500 раз по сравнению с нормальной (при атмосферном давлении и обычной температуре). Отсюда вытекает, что основные представления теории газов действительно до высоких плотностей. Точного объяснения этого незначительного возрастания мы не имеем. Может быть, оно обусловлено тем, что уменьшение эффективного диаметра молекул в плотных газах, по сравнению с разреженными, объясняется частичной взаимной компенсацией воспринимаемых вместе молекулярных сил, развиваемых соседними молекулами.

С 1887 г. работа Варбурга концентрируется на изучении электропроводности газообразных, жидких и твердых тел, на исследовании электродвижущей силы и химических реакций при электрических явлениях в газах. Эти последние исследования позже привели его к тем работам, которые проложили новые пути в фотохимии. При чтении статей по газовому разряду изумляешься обилию тщательных экспериментов, которые тогда еще не направлялись ионной гипотезой. Из множества этих работ я рассмотрю только те, которые мне кажутся особенно важными.

В 1887—1888 гг. Варбург и Тегельмейер нашли, что при нагревании горного хрусталя до 200° он начинает проводить ток, как электролит, причем только параллельно, а не перпендикулярно главной оси. Поскольку они вначале применяли электроды из золота, возникала своего рода поляризация высокого напряжения, которая при приложении внешнего напряжения вызывала медленное уменьшение тока. При применении электродов из натриевой амальгамы эта поляризация исчезла. Те исследования, которые важны для изучения твердого агрегатного состояния, были плодотворно продолжены в последние годы Иоффе. В 1890 г. появилась одна работа Варбурга по гальванической поляризации, значение которой до сих пор не оценено полностью. Как известно, Гельмгольц дал для капиллярного электрометра Липпмана теорию, основанную на следующих соображениях. На границе раздела ртути — разбавленная серная кислота существует двойной электрический слой, одна обкладка которого находится в металле, а вторая в электролите. Возникающий при наложении напряжения поляризационный ток меняет плотность в двойном слое так,

что поверхность металла в этом явлении играет роль изолятора. Наблюдаемое поверхностное напряжение соприкасающейся с электролитом ртути состоит из собственно поверхностного напряжения T_0 (положительного) поверхностного слоя и отрицательного напряжения T двойного электрического слоя. Таким образом, по его теории, общее напряжение $T_0 + T$ максимально, когда T , следовательно и двойной электрический слой, исчезают. Мы имели бы здесь средство заставить исчезнуть разность потенциалов между ртутью и электролитом и таким образом измерить абсолютную разность потенциалов между металлом и электролитом.

Вопреки этому, Варбург считал, что большая часть тока поляризации может быть вполне использована для выделения водорода на катоде, а изменение общего поверхностного напряжения $T_0 + T$ ртути обусловлено изменением поверхности ртути (а значит, и T) под действием выделившегося водорода. Это предположение ведет, конечно, и к другой теории поляризации, отличной от чисто физической теории Гельмгольца. Варбург в нескольких работах обстоятельно обосновал свою точку зрения, и мне кажется, что этим исследованием он проложил новые пути в далеко еще не завершенной области электрохимии пограничных слоев.

С этой проблемой связаны две важные работы Варбурга: одна 1896 г. — о поведении неполяризующихся электродов при переменном токе — и вторая 1901 г. — о поляризуемости платины. «Неполяризующимся электродом» является, например, медь относительно раствора CuSO_4 . Сегодня мы его характеризуем тем, что электрическая разность потенциалов между металлом и электролитом в каждый момент времени определяется концентрацией металлических ионов у электрода. Как показал Варбург, в этом случае вся поляризация сводится к ограниченному диффузией изменением концентрации у катодов вследствие электролиза. Разность фаз между эдс поляризации и током в этом случае намного меньше $\pi/2$ (например, порядка 40°). Иное дело происходит у поляризующихся электродов, например ртуть — разбавленная серная кислота. В этом случае запоздание фазы напряжения поляризации относительно тока при высоких частотах переменного тока только немного меньше $\pi/2$; электроды ведут себя подобно конденсатору большой емкости. Варбург показал, что этот случай можно объяснить, если предположить, что продукты электролиза, например водород, благодаря электролизу периодически отделяются от электрода (платинового) и растворяются, причем в первом приближении разность потенциалов электрод — электролит зависит от массы отделившегося вещества линейно. Без диффузии отделившегося вещества (например, водорода) в растворе и внутри электрода разность фаз между током и напряжением была бы $\pi/2$, но диффузия несколько уменьшает эту разность. Эти процессы Варбург проанализировал во второй из названных работ.

Многочисленные тонкие исследования химического действия тихих электрических разрядов должны быть оценены теми, кто лучше меня может судить о мастерстве тонкой экспериментальной работы. Это относится и к выполненным Варбургом совместно с физиками государственного физико-технического института исследованиям о планковской формуле излучения. Кто хочет получить представление о богатом открытиями экспериментальном мастерстве Варбурга, о его критической предусмотрительности и неустанной работоспособности, тот должен изучить его сочинения в оригинале. Но о его фотохимических исследованиях последних лет нужно напомнить, ибо без преувеличения можно сказать, что лишь с них начинается количественная фотохимия. Он совершенно убедительно показал на примере газовых реакций — впервые в 1906 г. на бромистом водороде, — что первичный процесс в восприятии кванта энергии $h\nu$ действующего излучения осуществляется молекулой. Этот первичный процесс поглощения сам по себе еще ничего не значит для последующих химических реакций, которым он лишь поставляет энергию. Поглотившая квант молекула имеет теперь особые возможности для реакции. Она либо спонтанно распадается (при достаточно больших энергиях кванта), а затем продукты распада вступают в реакции с другими молекулами, либо сама вступает в реакцию с другими молекулами. Только в случае, когда эти химические реакции однозначно связаны с поглощением квантов, можно теоретически предвидеть число прореагировавших на каждый квант. Примером может служить случай с HBr , где на каждый поглощенный квант энергии образуется одна молекула H_2 и одна Br_2 . Что это важное подтверждение квантовой теории пришло столь поздно, объясняется, с одной стороны, большими экспериментальными трудностями (измерение поглощенной энергии ультрафиолетового излучения, малость реагирующих количеств газа, достижение необходимой чистоты газов), а с другой стороны — трудностью теоретической интерпретации экспериментальных данных.

Эти строки могут дать лишь слабое представление о деле всей жизни столь многогранного ученого. Но, возможно, некоторые коллеги расположены углубиться в те или иные из его оригинальных работ, приведенных в последующем за статьей указателе¹. Возможно, что некоторые из этих статей будут встречены лучше, чем те немногие, содержание которых кратко изложено выше.

¹ См. примечание на стр. 91. — Прим. ред.

К СТОЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЛОРДА КЕЛЬВИНА

(26 июня 1824 г.)

Все физики знают и любят В. Томсона (лорда Кельвина) как одного из наиболее сильных и плодотворных мыслителей XIX столетия, как основателя теоретической школы, из которой вышел гениальнейший теоретик нового времени К. Максвелл. Одаренный богатой фантазией, редким умением применять математический аппарат и проникновенным умом, Томсон около 60 лет участвовал в развитии физики и различных отраслей техники, добыв множество результатов, сохранивших свое значение до сегодняшнего дня; немногие ученые были столь же плодотворны.

Наиболее существенный вклад Томсона в развитие физики — это основание термодинамики. Одновременно эта работа была выполнена и Клаузиусом; они плодотворно влияли друг на друга. В возрасте 23 лет он вводит одно из фундаментальнейших понятий физики — абсолютную температуру, без которой сегодня мы не можем себе представить эту науку.

Обилие результатов, которыми мы обязаны Томсону в области учения о теплоте, гидродинамики, учения об электричестве, навигации, физической географии и измерительной техники, совершенно необозримо. Изящество метода всегда доставляет читателю высокое наслаждение. Воспоминания об организационных и играющих не последнюю роль материальных результатах позволяют признать его долгую и богатую жизнь блестящей. И все-таки в деятельности этого высокого ума есть нечто трагическое.

Фундаментом для всего творчества Томсона была механика Ньютона. Этот стремящийся к единству познания ум глубоко верил, что сущность всех физических явлений сводится к движению и что механика Ньютона дает, в конце концов, ключ к пониманию всего происходящего. Верный этому убеждению, призвав все свои творческие силы, он на протяжении многих десятилетий пытался создать механическую теорию атомистики и электромагнитных явлений. Но открытые к концу его жизни рентгеновские лучи и ра-

диоактивные явления показали, что все его усилия в этом направлении были напрасны, а основное его убеждение было ошибочным. Начался период неопределенности и изменчивости основ физики; этому периоду еще и сегодня не видно конца. Если бы Томсону, которому этому периоду еще и сегодня не видно конца. Если бы Томсону, которому эти основы физического познания почти до конца жизни казались незыблемыми, удалось бы вдруг ознакомиться с нашей современной литературой, он бы ужаснулся.

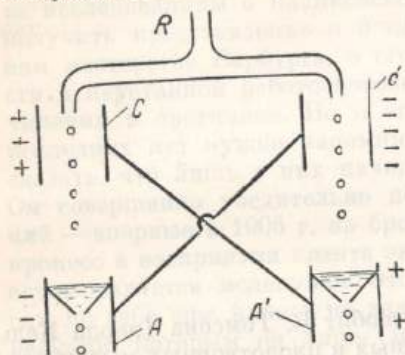


Рис. 1. Установка для получения электростатических зарядов с помощью капель воды

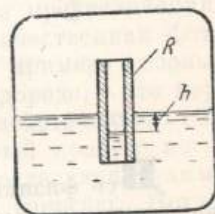


Рис. 2. Влияние кривизны поверхности жидкости в капиллярах на давление паров

Чем пытаться охватить все работы Томсона, я лучше покажу четкость его исследовательской мысли на нескольких примерах, которые меня в свое время особенно восхитили.

Установка для получения электростатических зарядов с помощью капель воды.

Из заземленной водонаполненной трубки R (рис. 1) вытекают две струи, которые внутри пустотелых изолированных металлических цилиндров C и C' разбиваются на капли. Эти капли падают в изолированные подставки A и A' со вставленными воронками. C соединен проводником с A' , а C' с A . Если C заряжен положительно, то образующиеся внутри C капли заряжаются отрицательно и отдают свой заряд A , заряжая тем самым C' отрицательно. Из-за отрицательного заряда C' образующиеся внутри него водяные капли получают положительный заряд и разряжаются в A' , увеличивая его положительный заряд. Заряд C , A' и C' , A возрастает до тех пор, пока изоляция препятствует проскакиванию искры.

Влияние кривизны поверхности жидкости в капиллярах на давление пара.

Капиллярная трубка (внутренний радиус R , рис. 2) погружена, например, в несмачивающую жидкость. При равновесии в трубке устанавливается капиллярное понижение

$$h = \frac{2\sigma}{R\rho g} \quad \left(\begin{array}{l} \sigma - \text{капиллярная постоянная} \\ \rho - \text{плотность жидкости} \\ g - \text{ускорение силы тяжести} \end{array} \right)$$

Если обозначить плотность пара ρ_0 (малое по сравнению с ρ), то в пространстве над свободной поверхностью жидкости будет изгиб давления

$$\Delta p = \rho_0 gh = \frac{2\sigma}{R} \frac{\rho_0}{\rho}.$$

Этот результат действителен независимо от того, какими причинами обусловлено возникновение кривизны поверхности.

Доказательство теоремы Гельмгольца о вихрях.

Пусть L — замкнутая кривая, пробегаемая в лишенной трения жидкости со скоростью, компоненты которой равны u_v . Тогда по теореме Стокса линейный интеграл

$$W = \int_L \Sigma u_v dx_v$$

(u_1, u_2, u_3 — компоненты скорости, x_1, x_2, x_3 — координаты) равен поверхностному интегралу от вектора вихря по произвольной поверхности, опирающейся на L . Зададимся вопросом о временной зависимости величины вихря W при условии, что кривая участвует в течении жидкости. Обозначив относящуюся к отдельной частице жидкости производную по времени $\frac{D}{Dt}$, а соответствующий дифференциал D , имеем для произвольной величины ψ

$$\frac{D\psi}{Dt} = \frac{\partial\psi}{\partial t} + \Sigma u_v \frac{\partial\psi}{\partial x_v}.$$

Если предположить, что плотность жидкости ρ является функцией только давления, а внешние силы однозначно определяются потенциалом ϕ , т. е. положить, что $\pi = \int \frac{dp}{\rho}$, то эйлеровы уравнения для движения жидкости дадут

$$\frac{Du_v}{Dt} = - \frac{\partial\pi}{\partial x_v} - \frac{\partial\phi}{\partial x_v}.$$

Тогда имеем

$$Du_v = - dt \frac{\partial(\pi + \phi)}{\partial x_v} \quad \text{и} \quad Ddx_v = dt \sum \frac{\partial u_v}{\partial x_v} dx_v.$$

Отсюда следует, что

$$DW = \int \Sigma (Du_v dx_v + u_v Ddx_v) = dt \int \Sigma dx_v \frac{\partial}{\partial x_v} \left(-\pi - \phi + \sum \frac{u_v^2}{2} \right) = 0.$$

В этом результате $DW = 0$ содержатся теоремы Гельмгольца о вихрях.

По случаю столетия со дня рождения В. Томсона мы с благодарностью вспоминаем этого мастера; будем надеяться, что когда-нибудь удастся охватить достижения физики нашего времени столь же просто и наглядно, как мы это видим у него.

ИСААК НЬЮТОН

Разум несомненно кажется слабым, когда мы думаем о стоящих перед ним задачах; действительно, слабым, когда мы противопоставляем его безумству и страстям человечества, которые, надо признать, руководят почти полностью судьбами человеческими как в малом, так и в большом. Но творения интеллекта переживают шумную суету поколений и на протяжении веков озаряют мир светом и теплом. Утешившись этой мыслью, возвратимся в эти смутные дни к памяти Ньютона, который был дан человечеству три столетия тому назад.

Думать о нем, значит думать о его творчестве. Такой человек может быть понят, только если думать о нем, как о сцене, на которой разворачивалась борьба за вечную истину. Задолго до Ньютона находились сильные умы, полагавшие, что возможно дать убедительные объяснения явлений, воспринимаемых нашими чувствами, путем чисто логической дедукции из простых физических гипотез. Но Ньютон был первым, кому удалось найти ясно сформулированную основу, из которой с помощью математического мышления можно было логически вывести количественно и в соответствии с опытом широкую область явлений. Фактически он вполне мог надеяться, что фундаментальная основа его механики могла бы со временем дать ключ для понимания всех явлений. Так думали его ученики и последователи вплоть до конца XVIII в., причем с гораздо большей уверенностью, чем сам Ньютон. Как в его мозгу зародилось это чудо? Извини, читатель, этот нелогичный вопрос. Ибо если разумом мы могли бы рассмотреть проблему этого «как», то не стояла бы уже проблема чуда в собственном смысле слова. Целью всей деятельности интеллекта является превращение некоторого «чуда» в нечто постигаемое. Если в данном случае чудо поддается такому превращению, наше восхищение умом Ньютона только возрастает.

Искусно интерпретируя самые простые опытные факты, Галилей установил следующее положение: тело, на которое не действуют никакие внешние силы, сохраняет неизменной свою начальную скорость (и ее направление); если оно меняет скорость (или направление своего движения), изменение должно быть приписано внешней причине.

Чтобы количественно использовать знание этого положения, надо вначале дать точную математическую интерпретацию понятиям скорости и величины изменения скорости, т. е. ускорения, в случае заданного движения тела, которое можно считать не имеющим размеров (материальной точки). Эта задача привела Ньютона к открытию основ дифференциального и интегрального исчислений.

Это было само по себе творческим достижением первого ранга. Но для Ньютона, как физика, это было просто изобретением нового рода познавательного языка, в котором он нуждался для формулировки общих законов движения. Он теперь мог выдвинуть гипотезу о том, что для заданного тела его точно определенное по величине и направлению ускорение пропорционально действующей на него силе. Коэффициент пропорциональности, характеризующий способность тела к ускорению, полностью описывает тело (без размеров) в отношении его механических свойств: так было открыто фундаментальное понятие массы.

Все предыдущее может быть названо — правда, наиболее скромно — точной формулировкой чего-то, сущность чего была уже познана Галилеем. Но ему не удалось решить главную задачу. Другими словами, закон движения определяет движение тела, только если направление и величина действующей на него силы известны для всех моментов времени. Таким образом, задача сводится к другой: как найти действующие силы? Для ума, менее смелого, чем у Ньютона, эта задача могла казаться неразрешимой, если принять во внимание огромное разнообразие воздействий, которые тела Вселенной способны производить друг на друга. К тому же тела, движения которых мы можем воспринимать, совсем не являются безразмерными точками, т. е. не воспринимаются как материальные точки. Как удалось Ньютону изучить подобный хаос?

Когда мы толкаем тележку по горизонтальной плоскости без трения, сила, с которой мы на нее действуем, непосредственно задана. Это идеальный случай, из которого выведен закон движения. То, что мы имеем здесь дело не с материальной точкой, кажется маловажным.

Что произойдет с телом, падающим в пространстве? Свободно падающее тело ведет себя так же просто, как безразмерная точка, если рассматривать его движение в целом. Оно ускоряется вниз.

По Галилею, это ускорение не зависит от природы тела и его

скорости. Понятно, что Земля играет решающую роль в существовании этого ускорения. Тогда казалось, что Земля воздействует на тела своим существованием. Земля состоит из многих частей. Представлялась неизбежной мысль, что на падающее тело действует каждая из этих частей, и все эффекты складываются. Казалось тогда, что существует обусловленная самим присутствием тел сила, с которой эти тела действуют друг на друга через пространство. Эти силы представлялись независимыми от скоростей; они зависят только от относительного положения и от некоторого количественного свойства различных тел, развивающих эти силы. Это количественное свойство могло быть обусловлено массой, так как казалось, что именно масса характеризует тело с механической точки зрения. Это странное воздействие предметов на расстоянии могло быть названо гравитацией.

Чтобы теперь точно определить этот эффект, остается лишь найти, как велика сила взаимодействия двух тел заданной массы на заданном расстоянии. Что касается направления, то оно, очевидно, совпадает с прямой, их соединяющей. Наконец, остается неизвестной только зависимость этой силы от расстояния между телами. Но ее нельзя узнать априори. В этом случае мог быть полезным только опыт.

Между тем в распоряжении Ньютона был такой опыт. Ускорение Луны на ее орбите известно, и его можно было сравнить с ускорением тела, свободно падающего у поверхности Земли. Впрочем, движения планет вокруг Солнца были определены Кеплером с большой точностью; он их описал простыми эмпирическими законами. Тогда появилась возможность обрисовать, каким образом действие тяготения, идущего от Земли и от Солнца, зависит от фактора расстояния. Ньютон нашел, что все явления могут быть объяснены силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Этим цель была достигнута. Зародилась наука о небесной механике, тысячу раз подтвержденная самим Ньютоном и теми, кто пришел после него. Но как быть с остальной физикой? Гравитация и закон движения не могли объяснить всего. Чем обусловлено равновесие частей твердого тела? Как объяснить световые и электрические явления? Казалось, что если ввести материальные точки и различного рода силы, действующие на расстоянии, можно будет удовлетворительным образом вывести все из закона движения.

Эта надежда не сбылась, и теперь никто не думает о разрешении всех наших проблем на этой основе. Несмотря на это, мышление современных физиков в значительной мере обусловлено основополагающими концепциями Ньютона. До сих пор не удалось заменить единую концепцию мира Ньютона другой, столь же всеохватывающей единой концепцией. Но то, что мы добыли до сих пор, было бы невозможно получить без ясной системы Ньютона.

Интеллектуальные орудия, без которых было бы невозможно развитие современной техники, пришли в основном от наблюдения звезд. За злоупотребление этой техникой в наше время творческие умы, подобные Ньютону, так же мало ответственны, как сами звезды, созерцание которых окрыляло их мысли. Это необходимо сказать, потому что в наше время интеллектуальные ценности сами по себе не пользуются таким живым уважением, как в века интеллектуального возрождения.

ОЦЕНКА РАБОТ СИМОНА НЬЮКОМА

Дорогая миссис Уитни,

Берлин 15/7/1926.

Ссылаясь на нашу встречу в помещении Лиги наций, я постараюсь привести здесь те данные, которые вас интересовали.

Дело жизни Вашего отца имеет огромное значение для астрономии. Его можно характеризовать следующим образом. Кеплер эмпирически открыл законы, которые управляют движением планет вокруг Солнца в отсутствие других планет. Из них Ньютон вывел носящие его имя общие законы движения, а также закон тяготения. Законы Ньютона утверждают в совершенно общем виде, каким должно быть движение масс, если на них действуют только силы взаимного тяготения. Если имеется более двух масс, то расчеты движения за длительный период времени связаны с большими трудностями. Но в нашей солнечной системе эти взаимосвязи сказываются гораздо меньше, так как одно из тел, Солнце, значительно преобладает в массе. В случае одной планеты вычисления приводят к результатам, мало отличающимся от тех, которые бы получились, если бы существовали только эта планета и Солнце. Если бы не это обстоятельство, Кеплер не смог бы открыть свои законы, и трудно себе представить, по какому пути пошла бы астрономия.

Оставалась, однако, задача определения влияния, оказываемого на каждую отдельную планету всеми остальными планетами. Это астрономическая задача о «возмущениях»; за последние 100 лет она привлекла внимание наиболее выдающихся математиков и астрономов. Ваш отец был последним из великих ученых, которые, имея в виду эту задачу, весьма тщательно вычислили движения в солнечной системе. Эта задача настолько грандиозна, что лишь немногие могли самостоятельно и критически взяться за ее решение.

Эта работа имеет большое значение для понимания законов природы, поскольку только таким путем можно установить досто-

верность законов Ньютона. Сравнение вычислений с фактическими данными показывает, что теория исключительно точно отражает эксперименты. Небольшое, выходящее за пределы ошибок измерений отклонение от вычисленной орбиты было обнаружено только для ближайшей к Солнцу планеты, Меркурия. В самом деле, наблюдения обнаружили медленное вращение большой оси в плоскости орбиты в направлении движения Меркурия. Это вращение нельзя объяснить за счет возмущений, вычисленных на основе законов Ньютона. Скорость этого вращения составляет примерно 40 секунд за столетие, т. е. она настолько незначительна, что потребовалось бы не менее 30 000 лет для совершения полного оборота орбитальной оси. До сих пор все попытки объяснить удовлетворительно это отклонение в соответствии с теорией Ньютона были в основном безуспешными.

Затем, каких-нибудь десять лет назад, теоретические исследования в теории относительности показали, что законы Ньютона нельзя считать строго верными; они верны лишь с большим приближением. Точные законы, полученные умозрительными методами, доказывают, что слабое вращение большой оси орбиты происходит при движении любой планеты, независимо от возмущений, вызванных другими планетами. Для всех планет, кроме Меркурия, это вращение слишком незначительно, чтобы его наблюдать. Что касается Меркурия, то расчет дал точно те сорок секунд за столетие, которые до сих пор вызывали так много недоумений.

Таким образом, теория относительности завершила работу по вычислению возмущений и привела к полному согласию между теорией и опытом.

С сердечным приветом,
Ваш А. Эйнштейн.

ИОГАНН КЕПЛЕР (1930)

В наше беспокойное и полное забот время, когда мало радуют людские дела, особенно приятно вспомнить о таком спокойном человеке, каким был великий Кеплер. Он жил в эпоху, когда не было еще уверенности в существовании некоторой общей закономерности для всех явлений природы. Какой глубокой была у него вера в такую закономерность, если, работая в одиночестве, никем не поддерживаемый и мало понятый, он на протяжении многих десятков лет черпал в ней силы для трудного и кропотливого эмпирического исследования движения планет и математических законов этого движения! Достоинство отметить его память — это значит возможно яснее представить себе поставленную им задачу и этапы ее решения.

Коперник раскрыл глаза выдающимся умам, показав, что наилучший способ получить ясное представление о кажущихся движениях планет на небе состоит в рассмотрении этого движения как обращения вокруг предполагаемого неподвижного Солнца. Если бы планеты двигались равномерно по окружности вокруг Солнца, как центра, то было бы сравнительно легко определить, как эти движения должны выглядеть с Земли. Но так как при этом имеем дело с более сложными явлениями, то и задача была намного труднее. Вначале нужно было определить эти движения эмпирически, из наблюдений Тихо Браге. Только после этого можно было думать об установлении общих законов, которым подчиняются эти движения. Чтобы постигнуть, какой сложной была уже задача определения истинного вращения, нужно хорошо уяснить себе следующее обстоятельство: мы всегда наблюдаем не истинное положение планеты в определенный момент, а только направление, в котором она видна с Земли, которая сама описывает неизвестного рода движение вокруг Солнца. Трудности казались почти непреодолимыми.

Кеплер должен был найти способ приведения в порядок этого хаоса. Он отдавал себе отчет, что прежде всего нужно попытаться определить движение самой Земли.

Это было бы просто невозможно сделать, если бы кроме Солнца, Земли и неподвижных звезд не существовали бы и другие планеты. Если бы последних не было, то из опытов можно было бы определить только годичное изменение направления Солнца — Земли (т. е. видимое движение Солнца относительно неподвижных звезд). Можно было бы установить, что это направление всегда лежит в неизменной по отношению к неподвижным звездам плоскости, по крайней мере с достигаемой тогда точностью наблюдений, производимых без применения телескопа. Можно было определить и каким образом прямая Солнца — Земли вращается вокруг Солнца. Было установлено, что угловая скорость этого движения в течение года меняется по определенному закону.

Но этого было недостаточно, так как оставался неизвестным закон годичного изменения расстояния Солнца — Земли. Только после установления этого закона можно было найти истинную орбиту Земли и способ ее прохождения.

Кеплер нашел замечательный выход из этой дилеммы. Наблюдая Солнце, можно было установить, что хотя видимый путь этого светила на фоне неподвижных звезд обладает в разные времена различной скоростью, угловая скорость этого движения в одни и те же моменты астрономического года всегда одинакова. Следовательно, скорость вращения прямой Земли — Солнце имела одну и ту же величину, будучи направленной в одну и ту же область неба неподвижных звезд. Это вовсе не было очевидно априори. Но сторонники системы Коперника были почти убеждены, что такое утверждение остается справедливым и для орбит других планет.

Это безусловное облегчение. Но как определить действительную форму орбиты Земли? Представим себе, что где-то в плоскости этой орбиты расположен ярко светящийся фонарь M , о котором известно, что он длительное время сохраняет свое положение неизменным. Такой фонарь может служить своеобразным триангуляционным пунктом, так как жители Земли могут его визировать в любое время года. Фонарь M расположен от Солнца дальше, чем Земля. С помощью такого фонаря можно определить орбиту Земли следующим способом.

Ежегодно в определенный момент времени Земля E находится точно на прямой, соединяющей Солнце S с фонарем M . Если в этот момент визировать с Земли направление на фонарь M , то получим и направление SM (Солнце — фонарь). Допустим, что последнее отмечено на небесном своде. Представим себе теперь положение Земли в другой момент. Если и Солнце S , и фонарь M видны с Земли E , то в треугольнике SEM известен угол E . Раньше мы раз и навсегда определили направление прямой SM относительно неподвижных звезд. Теперь прямым наблюдением Солнца

можно определить направление SE относительно неподвижных звезд. Таким образом, в треугольнике SEM становится известным и угол S . Следовательно, взяв произвольную величину основания SM , можно строить на бумаге треугольник SEM по двум известным углам. Это построение можно повторить в течение года несколько раз. На рисунке всякий раз получим соответствующее определенной дате местоположение Земли E относительно раз и навсегда заданного основания SM . Орбита определяется, таким образом, эмпирически; конечно, с точностью до произвольной абсолютной величины.

Но — спросите вы — откуда Кеплер взял фонарь M ? Тут ему помогли его гений и добрая воля природы. Существовала, например, планета Марс, для которой была известна продолжительность года, т. е. время обращения вокруг Солнца. Однажды могло случиться, что Солнце, Земля и Марс расположились точно на одной прямой. Такое положение Марса повторяется через один, два и т. д. марсианских года, потому что Марс описывает замкнутый путь. В эти известные моменты SM всегда одинакова, тогда как Земля находится каждый раз в другой точке своей орбиты. Следовательно, наблюдения Солнца и Марса в эти моменты дают способ определения истинной орбиты Земли, причем в эти моменты Марс играл роль вышеуказанного фонаря! Так Кеплер нашел истинную форму орбиты Земли и характер движения Земли по этой орбите. Все мы, рожденные позже европейцы, немцы, а тем более швабы, должны ему поклоняться и воздавать хвалу.

Как только орбита Земли была эмпирически найдена, стало возможным определить истинное положение и величину отрезка SE . В принципе для Кеплера уже не представляло труда установить по наблюдениям планет орбиты и перемещения последних. Но это был все-таки колоссальный труд, особенно если учесть состояние математики того времени.

Оставалось решить вторую часть задачи: орбиты эмпирически были известны, но их законы нужно было угадывать по результатам опытов. Выставлять определенное допущение о виде орбитальных кривых, затем проверять его на огромном численном материале! Если результаты не совпадали, то выдумывать новую гипотезу и вновь проверять! После бесчисленных попыток Кеплер пришел к следующему выводу: орбита представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Он нашел и закон, по которому меняется скорость в течение одного года: отрезок Солнце — планета в равные промежутки времени описывает равные площади. Наконец, он нашел, что квадраты времен обращения относятся как кубы осей эллипсов. На решение этих задач ушла вся жизнь Кеплера.

К восхищению перед этим замечательным человеком добавляется еще одно чувство восхищения и благоговения, но относящееся не к человеку, а к загадочной гармонии природы, в которой мы

рождены. Еще в древности люди придумали кривые, которые соответствуют простейшим законам. Наряду с прямой и окружностью среди них были эллипс и гипербола. Последние мы видим реализованными в орбитах небесных тел, во всяком случае с хорошим приближением.

Представляется, что человеческий разум должен свободно строить формы, прежде чем подтвердилось бы их действительное существование. Замечательное произведение всей жизни Кеплера особенно ярко показывает, что из голой эмпирии не может расцвести познание. Такой расцвет возможен только из сравнения при-
думываемого и наблюдаемого.

ОБ ЭДИСОНЕ

Со смертью Эдисона мы потеряли одного из наиболее выдающихся изобретателей. Его технические изобретения позволяют облегчить и украсить нашу повседневную жизнь. Изобретательский дух озарил ярким светом и его собственную жизнь, и наше существование. С благодарностью мы принимаем его наследство, и не только как дар гения, но и как переданное в наши руки поручение. На новое поколение падает задача нахождения путей правильного использования переданного нам дара. Только решив эту задачу, новое поколение окажется достойным этого наследства и действительно станет счастливее предыдущих поколений.

К СЕМИДЕСЯТИЛЕТНЮ Д-РА БЕРЛИНЕРА

Я хотел бы здесь объяснить своему другу Берлинеру и читателям этого журнала¹, почему так высоко ценю его труд. Это должно быть сделано именно в этом месте, потому что иначе не представится подходящего случая высказать такое. Воспитанная в нас привычка к объективному наложила «табу» на все личное; согрешить против нее можно только в исключительных случаях, один из которых представляется мне сейчас.

После такой попытки к освобождению вернемся снова к объективному. Круг охватываемых наукой вопросов чрезвычайно расширился, теоретическое познание во всех областях естествознания непредвиденно углубилось. Но познавательная способность человека ограничена узкими рамками и не изменяется. Поэтому деятельность отдельных исследователей неизбежно стягивается ко все более ограниченному участку всеобщего знания. Эта специализация, что еще хуже, приводит к тому, что единое общее понимание всей науки, без чего истинная глубина исследовательского духа обязательно уменьшается, все с большим трудом поспекает за развитием науки. Создается ситуация, подобная той, которая символически изложена в библейской истории о Вавилонской башне. Каждому серьезному ученому знакомо это болезненное чувство невольной ограниченности сужающимся кругом представлений; она угрожает отнять у исследователя широкую перспективу, принося его до уровня ремесленника.

Мы все страдали от этого бедствия, но ничего не предпринимали для его ослабления. Берлинер же оказал большую помощь говорящим на немецком языке. Он видел, что существующие популярные журналы достаточны, чтобы дать сведения и советы неспециалисту. Но он видел также, что для ознакомления с наукой

¹ А. Берлинер был основателем и издателем журнала «Die Naturwissenschaften». — Прим. ред.

ученым, которые хотят ориентироваться в развитии научных проблем, методов и результатов настолько, чтобы иметь возможность составить себе собственное мнение, необходим особенно тщательно и систематически издаваемый орган. В своей многолетней работе он преследовал эту цель с большим пониманием и не меньшим упорством, чем оказал всем нам и науке в целом такую услугу, за которую мы не в состоянии его достаточно отблагодарить.

Он должен был привлекать для сотрудничества в качестве авторов удачливых ученых, вынуждая их при этом излагать свою тему в форме, понятной, насколько это возможно, даже неспециалистам. Он мне часто рассказывал о боях, которые ему пришлось вести для достижения этой цели. При мне он однажды выразил возникающие трудности в следующем шутиливом вопросе: «Что такое автор-ученый»? Ответ: «Скращение мимозы с дикобразом»¹.

Стимулом всей деятельности Берлинера было стремление к выработке ясного представления о различных областях науки. Этой цели соответствует и написанный им учебник физики, явившийся результатом многолетней напряженной работы. Об этом учебнике один студент-медик сказал мне недавно: «Не знаю, как без этой книги за имеющееся в моем распоряжении время я смог бы уяснить себе принципы современной физики!»

Стремление Берлинера к тому, чтобы в журнале все было изложено наглядно и предельно ясно, в большой мере способствовало усвоению читателями проблем, методов и результатов науки. Нелзя представить себе научную жизнь нашего времени без созданного им журнала. Сделать познание живым и сохранить эту живость так же важно, как и решить отдельную проблему. Мы все знаем, чем обязаны Арнольду Берлинеру!

¹ Не сердись, дорогой Берлинер, за эту нескромность. Серьезный человек радуется, когда ему удастся хоть раз посмеяться от всего сердца!

ПАМЯТИ ПАУЛЯ ЭРЕНФЕСТА

В наши дни люди с выдающимися качествами так часто кончают жизнь самоубийством, что мы уже не видим в этом ничего необычного. Но решение расстаться с жизнью происходит вообще говоря, из неспособности (а иногда и из отвращения) приспособиться к новым и более трудным *внешним* условиям. Отказ прожить жизнь до естественного конца вследствие нестерпимых внутренних конфликтов — редкое сегодня событие среди людей со здоровой психикой; иное дело среди личностей возвышенных и в высшей степени душевно возбудимых. Из-за такого внутреннего конфликта скончался наш друг Пауль Эренфест. Те, кто были знакомы с ним так же хорошо, как было дано мне, знают, что эта чистая личность пала жертвой главным образом такого конфликта совести, от которого в той или другой форме не гарантирован ни один университетский профессор, достигший пятидесятилетнего возраста.

Мы познакомились 25 лет тому назад. Он посетил меня в Праге, куда приехал прямо из России; как еврей, он был лишен там возможности преподавать в высших учебных заведениях. Поэтому он искал себе поле деятельности в Центральной или Западной Европе. Но об этом мы говорили мало, потому что почти все наше внимание поглотило состояние науки того времени. Мы оба отдавали себе отчет, что классическая механика и теория электрического поля оказались недостаточными для объяснения явлений теплового излучения и молекулярных процессов (статистическая теория), но не создавалось впечатления, чтобы Эренфест видел путь выхода из этого положения. Логическая брешь в планковской теории излучения, которой мы тем не менее восхищались, была для нас очевидной. Мы обсуждали также теорию относительности, которую он воспринял хотя и несколько скептически, но отдавая ей

должное со свойственной ему способностью критического суждения. За несколько часов мы стали настоящими друзьями, будто наши чаяния и мечты были одинаковыми. Нас соединила тесная дружба, продолжавшаяся до его смерти.

Его величие заключалось в чрезвычайно хорошо развитой способности улавливать самое существо теоретического понятия и настолько освобождать теорию от ее математического наряда, чтобы лежащая в ее основе простая идея проявлялась со всей ясностью. Эта способность позволяла ему быть бесподобным учителем. По этой же причине его приглашали на научные конгрессы, ибо в обсуждениях он всегда вносил изящество и четкость. Он боролся против расплывчатости и многословия; при этом пользовался своей пронизательностью и бывал откровенно неучтив. Некоторые его выражения могли быть истолкованы как высокомерные, но его трагедия состояла именно в почти болезненном неверии в себя. Он постоянно страдал от того, что у него способности критические опережали способности конструктивные. Критическое чувство обкрадывало, если так можно выразиться, любовь к творению собственного ума даже раньше, чем оно зарождалось.

Вскоре после нашей первой встречи в карьере Эренфеста произошёл решительный поворот. Наш высокочтимый наставник Лоренц, желая удалиться от регулярного преподавания в университете и видя в Эренфесте вдохновенного учителя, рекомендовал его в качестве своего преемника. Перед ним, еще молодым, открылось замечательное поле деятельности. Он не только был самым лучшим профессором из людей нашей профессии, которого я знал, но его страстно занимали становление и судьба людей, особенно его студентов. Понимать других, завоевать их дружбу и доверие, помогать тому, кто был стеснен внешней или внутренней борьбой, ободрять молодые таланты — все это было его истинным призванием, даже больше, чем углубление научных вопросов. В Лейдене его любили и уважали студенты и коллеги. Они знали его абсолютную преданность делу преподавания и постоянную готовность прийти на помощь. Не должен ли он был быть счастливым человеком?

Но на самом деле он был несчастнее всех бывших мне близкими людей. Причина состояла в том, что он не чувствовал себя на уровне той высокой задачи, которую должен был выполнять. Чем помогало ему всеобщее уважение? Его постоянно терзало объективно небоснованное чувство несовершенства, часто лишавшее его душевного покоя, столь необходимого для того, чтобы вести исследования. Он так страдал, что был вынужден искать утешения в развлечениях. Частые бесцельные путешествия, увлечение радио и многие другие черты его тревожной жизни происходили не от потребности покоя или безвредных маний, а скорее от странной и настойчивой потребности к бегству, вызванной психическим конфликтом, с которым мы говорили.

В последние годы это состояние обострилось из-за удивительно бурного развития теоретической физики. Всегда трудно преподавать вещи, которые сам не одобряешь всем сердцем; это вдвойне трудно фанатически чистой душе, для которой ясность — все. К этому добавлялась все возрастающая трудность приспособляться к новым идеям, трудность, которая всегда подстерегает человека, перешагнувшего за пятьдесят лет. Не знаю, сколько читателей этих строк способны понять эту трагедию. Но все-таки она была главной причиной его бегства из жизни.

Мне кажется, что тенденция чрезмерно критиковать самого себя связана с впечатлениями детства. Умственное унижение и угнетение со стороны невежественных и эгоистичных учителей производит в юной душе опустошения, которые нельзя загладить и которые оказывают роковые влияния в зрелом возрасте. О силе такого впечатления у Эренфеста можно судить по тому, что он отказался доверить какой-нибудь школе своих нежно любимых детей.

Большую, чем у большинства людей, роль сыграли в жизни Эренфеста его отношения с друзьями. Его симпатии и антипатии, основанные на суждениях морального порядка, фактически властвовали над ним. Самой сильной привязанностью в его жизни была жена и помощница, личность исключительно сильная и смелая, равная ему по интеллекту. Возможно, что ее ум не был столь проворным, гибким и чувствительным, как его собственный, но ее уравновешенность, независимость, стойкость перед трудностями, цельность мысли, чувства и действия были для него благодеянием, за которое он платил обожанием и любовью, какую мне не часто приходилось видеть в жизни. Случайная отчужденность между ними была страшным экспериментом, против которого его уже раненная душа была неспособна бороться.

Мы, чьи жизни обогащались силой и цельностью его ума, доброжелательностью и теплотой его щедрой души и в не меньшей мере его юмором и сарказмом, знаем, что потеряли с его смертью. Он продолжает жить в своих студентах и в тех, чьи помыслы направлял.

ПАМЯТИ МАРИИ КЮРИ

Сейчас, когда завершилась жизнь такой выдающейся личности, как мадам Кюри, нельзя ограничиваться воспоминанием только о том, что дали человечеству плоды ее творчества. Моральные качества выдающейся личности имеют, возможно, большее значение для данного поколения и всего хода истории, чем чисто интеллектуальные достижения. Последние зависят от величия характера в значительно большей степени, чем это обычно принято считать.

К моему великому счастью, в течение двадцати лет мы были связаны с мадам Кюри возвышенной и безоблачной дружбой. Мое восхищение ее человеческим величием постоянно росло. Ее сила, чистота помыслов, требовательность к себе, объективность, неподкупность суждений — все эти качества редко совмещаются в одном человеке. Она в любой момент чувствовала, что служит обществу, и ее большая скромность не оставляла места для самолюбования. Ее постоянно угнетало чувство жестокости и несправедливости общества. Именно это придавало ей вид внешней строгости, так легко неправильно понимаемой теми, кто не был к ней близок, — странной строгости, не смягченной каким-либо искусственным усилием.

Наиболее выдающийся подвиг всей ее жизни — доказательство существования радиоактивных элементов и их получение — обязан своим осуществлением не только смелой интуиции, но и преданности делу, упорству в выполнении работы при самых невероятных трудностях, что не часто встречается в истории экспериментальной науки.

Если бы европейские интеллигенты обладали даже небольшой частью силы характера мадам Кюри и ее преданности делу, Европе ждало бы более блестящее будущее.

ПАМЯТИ ВАЛЬТЕРА НЕРИСТА

Недавно умерший Вальтер Нерист был одним из самых своеобразных и интересных ученых, с которыми я был тесно связан на протяжении всей своей жизни. Он никогда не отказывался от участия в конференциях по физике в Берлине; его краткие замечания свидетельствовали о поистине удивительном научном инстинкте, сочетающемся со знанием огромной массы реальных фактов, которые были всегда в его распоряжении, и с редким владением экспериментальными методами. Он был блистательным мастером эффектных опытов. Хотя мы часто добродушно посмеивались над его детским тщеславием и самодовольством, мы искренне восхищались им и любили его. Пока не затрагивалась его эгоистическая слабость, он проявлял редко встречающуюся объективность, умение безоспительно чувствовать и настоящую страсть к познанию глубоких взаимосвязей в природе. Без такой страсти его в высшей степени созидательное творчество и его заметное влияние на научную жизнь первой трети нашего века были бы невозможны. Он был последователем Аррениуса, Оствальда, Вант-Гоффа, как последний представитель династии, основывавшей свои исследования на термодинамике, осмотическом давлении и ионной теории. До 1905 г. его работа всецело ограничивалась этим кругом идей. Его теоретический багаж был несколько элементарен, но он владел им с редкой изобретательностью. Сошлюсь, например, на его теорию электродвижущих сил в растворах с локальным изменением концентрации, на теорию уменьшения растворимости путем добавления другого растворяющегося вещества. В этот период он изобрел забавный нулевой метод определения диэлектрической постоянной проводников электричества с помощью мостика Уитстона (переменный ток, телефон в качестве индикатора, компенсирующие емкости в плечах мостика сравнения).

Этот первый творческий период в основном посвящен улучшению методов и дополнению исследований в области, где принципы были известны еще до Нериста. Эта работа привела его постепенно к общей проблеме, которую можно охарактеризовать следующим

вопросом: возможно ли вычислить, исходя из известной энергии системы при определенных условиях, полезную работу, получаемую при ее переходе из одного состояния в другое? Нернст отдавал себе отчет, что теоретическое определение перехода в работу A разности энергии U с помощью одних лишь уравнений термодинамики невозможно. Из термодинамики можно вывести, что при температуре абсолютного нуля величины A и U должны быть равными. Но нельзя вывести A из U для любых произвольных температур, даже если значения энергии или разностей U известны при всех условиях. Этот расчет невозможен до тех пор, пока в соответствии с соотношением между этими величинами при низких температурах, не вводилось определенное предположение, которое вследствие своей простоты казалось очевидным. Это предположение очень простое и состоит в том, что при низких температурах A становится независимой от температуры. Введение этого допущения в качестве гипотезы (третье начало теории теплоты) является наиболее выдающимся вкладом Нернста в теоретическую науку. Позже Планк нашел теоретически более удовлетворительное решение, а именно, что при абсолютном нуле энтропия равна нулю.

С точки зрения более старых воззрений о теплоте, это третье начало требует существования весьма странных связей между телами при низких температурах. Благодаря точности этого принципа были значительно усовершенствованы методы калориметрии при низких температурах. Калориметрия высоких температур также значительно обязана Нернсту своим развитием. Всеми исследованиями, как и многими стимулирующими советами, которые он изобретательно и неустанно поставлял экспериментаторам, работающим в его области, Нернст весьма действенно продвинул поисковую работу своего поколения. Важные результаты этих калориметрических исследований помогли возникновению квантовой теории, особенно до того, как теория атома Бора сделала спектроскопию наиболее важной областью эксперимента. Классическая работа Нернста, озаглавленная «Теоретическая химия», представляет не только студентам, но и ученым обилие стимулирующих идей; она написана теоретически элементарно, но умно, живо и полна упоминаний о множестве взаимных отношений. Она поистине отражает характер его интеллекта.

Нернст был не только ученым. Его солидный здравый смысл втягивал его в успешные занятия всеми областями практической жизни, в беседах с ним всегда выявлялось что-нибудь интересное. Что отличало его почти от всех его соотечественников — так это отсутствие предвзятости. Он не был ни националистом, ни милитаристом. Он судил о вещах и людях почти исключительно по их достижениям, а не по какому-то социальному или моральному идеалу. Он интересовался литературой и обладал чувством юмора в такой мере, которая редко встречается у людей, так сильно загруженных столь трудной работой. Это была своеобразная личность; я никогда не встречал кого-либо, кто походил бы на него.

ПАМЯТИ ПОЛЯ ЛАНЖЕВЕНА

Известие о смерти Поля Ланжевена причинило мне более сильную боль, чем многие события этих горестных и полных разочарований лет. Почему так? Почему бы ему не наслаждаться долгой жизнью, заполненной плодотворной творческой работой, жизнью человека, гармонирующей с ним самим? Не был ли он широко почитаем за его проницательное знание интеллектуальных проблем, повсеместно любим за преданность всему хорошему и умную доброжелательность ко всему сущему? Не чувствовал ли он определенное удовлетворение от того, что жизни индивидуума поставлены естественные пределы, так что в конце она представляется произведением искусства?

Боль, которую мне причинила смерть Поля Ланжевена, была для меня особенно острой, потому что во мне возникло чувство одиночества и опустошенности. В одном поколении так мало людей, которые обладали бы одновременно ясным пониманием природы вещей, глубоким чувством истинных человеческих потребностей и способностью к активным действиям! Когда такой человек уходит из жизни, он оставляет пустоту, которая кажется невыносимой тем, кто его переживает.

Ланжевен обладал ясным и проницательным умом, в котором соединялись быстрота и уверенное интуитивное видение существенных начал. Результатом этих качеств было то обстоятельство, что его лекции оказали решающее влияние на несколько поколений французских физиков-теоретиков. Но он знал и значительную часть экспериментальной техники; его критика и конструктивные предложения всегда оказывали плодотворное действие. Его собственные исследования решающим образом повлияли на развитие науки, в основном магнетизма и ионной теории. И все-таки, бремя обязанностей, которые он всегда был готов принять на себя, ограничивало его личные исследования, так что плоды его трудов по-

являлись в публикациях других ученых больше, чем в его собственных.

Я уверен, что он бы развил специальную теорию относительности, если бы это не было сделано в другом месте, ибо он ясно заметил ее существенные черты. Замечательно и то, что он вполне оценил значение идей де Бройля — из которых Шредингер позже развил методы волновой механики — даже раньше, чем эти идеи консолидировались в прочную теорию.

Я живо припоминаю, с каким удовольствием и теплотой он мне говорил о них; вспоминаю также, что следил за его высказываниями с неуверенностью и сомнением.

В течение всей своей жизни Ланжевен страдал от того, что видел недостатки и несправедливости наших социальных и экономических институтов. Он все-таки твердо верил в силу разума и науки. Сердце его было настолько чисто, что он был убежден в готовности всех людей отказаться полностью от личного, как только они познали свет разума и справедливости. Разум был его верой — верой, которая должна была дать не только свет, но и спасение. Его желание помочь всем людям в том, чтобы они воспользовались более счастливой жизнью, было, возможно, сильнее, чем желание чисто умственного познания. Случалось, что он жертвовал много времени и энергии для выяснения политических вопросов. Никто из тех, кто обращался к его общественному сознанию, не уходил от него с пустыми руками. Истинное моральное величие его личности было причиной, вызвавшей ярую ненависть многих интеллигентов, скорее всего ограниченных. Но зато он понимал всех и в своей доброте не питал никакой неприязни к кому бы то ни было.

Я считаю большой удачей для себя то, что знал такого высокообразованного и духовно чистого человека.

ПАМЯТИ МАКСА ПЛАНКА

(1948)

Человек, которому было суждено одарить мир великой созидательной идеей, не нуждается в похвале потомства. Его творчество даровало ему более значительное благо.

Вместе с тем хорошо — и это даже необходимо, — что представители тех, кто борется за истину и знания, собрались сегодня здесь со всех четырех сторон света. Они присутствуют здесь, чтобы доказать, что даже в такие времена, как наши, когда политические страсти и грубая сила нависают, как шпаги, над головами встревоженных и трусливых людей, знамя идеала нашего поиска истины держится высоко и в чистоте. Этот идеал — вечная связь, объединяющая ученых всех времен и стран, — на редкость совершенно отражен в личности Макса Планка.

Уже греки поняли атомистическую природу материи, и эта концепция была возведена до высокой степени вероятности учеными XIX столетия. Но именно закон излучения Планка дал первое точное определение абсолютных величин атомов, независимо от других предположений. Больше того, он убедительно показал, что, кроме атомистической структуры материи, существует своего рода атомистическая структура энергии, управляемая универсальной постоянной h , введенной Планком.

Это открытие стало основой всех исследований в физике XX в. и с тех пор почти полностью обусловило ее развитие. Без этого открытия было бы невозможно установить действенную теорию молекул и атомов и энергетических процессов, управляющих их превращениями. Больше того, оно разрушило остов классической механики и электродинамики и поставило перед наукой задачу: найти новую познавательную основу для всей физики. Несмотря на значительные частные достижения, проблема еще далека от удовлетворительного решения.

Отдавая дань уважения великому человеку, Американская Национальная академия наук выражает надежду, что исследования ради чистого познания не будут прекращены и сохранят всю свою силу.

ИОГАНН КЕПЛЕР (1949)

Сочинения Кеплера свидетельствуют о том, что мы имеем дело с личностью, всецело и страстно преданной поискам более глубокого познания характера явлений природы, с человеком, который достиг поставленной перед собой возвышенной цели, вопреки всем внешним и внутренним трудностям. Жизнь Кеплера была посвящена решению двойной задачи. Изменение кажущегося положения Солнца и планет относительно неба неподвижных звезд вполне доступно непосредственному наблюдению. Другими словами, во всех наблюдениях и всех тщательно собранных документах рассматривались не истинные движения планет в пространстве, а мгновенные изменения, претерпеваемые с течением времени направлением Земля — планета.

Как только Коперник убедил небольшую группу людей, способных его понять, что в этом процессе Солнце нужно считать покоящимся, а планеты, в том числе Землю, вращающимися вокруг Солнца, возникла первая серьезная задача: определить истинные движения планет, в том числе Земли, т. е. определить, как эти движения должны представляться наблюдателю, находящемуся на ближайшей неподвижной звезде и вооруженному совершенным двойным стереоскопическим телескопом. В этом состояла первая великая задача Кеплера. Вторая задача выражается следующим вопросом: каковы те математические законы, которым подчиняются эти движения? Ясно, что решение второй задачи, если допустить, что человеческий разум в состоянии его найти, основано на решении первой. Проверка теории, объясняющей определенное явление, становится возможной только после познания этого явления.

Решение первой задачи основано на поистине вдохновенном представлении, сделавшем возможным определение истинной орбиты Земли. Чтобы построить эту орбиту, необходимо, кроме Солнца, иметь еще одну неподвижную точку в планетарном

пространстве. Если существует возможность пользоваться такой второй точкой, то вместе с Солнцем они могут служить точками отсчета для угловых измерений, и истинная орбита Земли может быть определена теми же методами триангуляции, которые обычно служат для межевания и картографирования.

Но где найти вторую неподвижную точку, если все видимые предметы, за исключением Солнца, сами участвуют в движениях, неизвестных в деталях? Вот ответ Кеплера: видимые движения Марса, включая его вращение вокруг Солнца («Марсианский год»), известны с большой точностью. Вероятно, в конце каждого марсианского года Марс находится в той же точке пространства (планетарного). Если пока ограничимся этими точками в моменты, когда Марс представляется неподвижной точкой в планетарном пространстве, то получим точку, которая может служить при триангуляции.

Пользуясь этим принципом, Кеплер прежде всего определил истинное движение Земли в планетарном пространстве. Имея возможность в некоторые моменты пользоваться самой Землей, как точкой для триангуляции, он оказался в состоянии, опираясь на свои наблюдения, определить также и истинные движения других планет.

Таким путем Кеплер получил основу для формулировки трех фундаментальных законов, которые на все времена будут связаны с его именем. Сегодня, когда этот научный акт уже свершился, никто не может оценить полностью, сколько изобретательности, сколько тяжелого труда и терпения понадобилось, чтобы открыть эти законы и столь точно их выразить.

Читатель должен знать, знакомясь с его работами, в каких стесненных условиях было осуществлено это грандиозное открытие. Он не опускал рук и не падал духом ни из-за бедности, ни из-за непонимания со стороны тех его современников, которые могли влиять на его жизнь и работу. А ведь он занимался предметом, представлявшим непосредственную опасность для того, кто проповедовал правду. Но Кеплер был одним из тех редких людей, которые просто неспособны уклоняться от открытой защиты своих убеждений в любой области. Вместе с тем он не был человеком, который мог бы найти удовлетворение в личных спорах, как это было в случае с Галилеем, живые остроты которого доставляют удовольствие образованному человеку даже в наши дни. Кеплер был благоверным католиком, но не скрывал того факта, что одобряет не все постановления своей церкви. Вследствие этого его рассматривали как своего рода умеренного еретика и относились к нему соответственно.

Это заставляет меня говорить о внутренних трудностях, которые ему приходилось преодолевать, трудностях, о которых я уже упоминал. Их не так легко заметить, как трудности внешние. Открытие Кеплера стало возможным только после того, как ему в значительной степени удалось освободиться от тех интеллектуаль-

ных традиций, которые над ним довлели. Это означает не только религиозную традицию, основанную на авторитете церкви, но также общие концепции о природе, идеи об ограниченных возможностях познания Вселенной и человека и понятия об относительном значении мышления и опыта в науке.

Он должен был освободиться от анимистического подхода к исследованию — рода мышления, направленного на то, что находится за пределами реальной жизни. Он должен был признать, что самая блестящая логическая математическая теория не дает сама по себе никакой гарантии истины и может не иметь никакого смысла, если она не проверена наиболее точными наблюдениями, возможными в науке о природе. Но для такой философской ориентации труды Кеплера не могли подходить. Он не говорит об этом, но внутренняя борьба отражается в его сочинениях. Пусть читатель обратит внимание на замечания, касающиеся астрологии. Они показывают, что поверженный внутренний противник был обезврежен, хотя и не был полностью умерщвлен.

Г. А. ЛОРЕНЦ КАК ТВОРЕЦ И ЧЕЛОВЕК

В начале нашего столетия физики-теоретики всего мира с полным правом смотрели на Г. А. Лоренца как на своего наставника. Физики молодого поколения в большинстве случаев не представляют себе полностью той огромной роли, которую сыграл Лоренц в становлении идей теоретической физики. Причина этого странного непонимания коренится в том, что фундаментальные идеи Лоренца настолько вошли в плоть и кровь, что молодые ученые вряд ли способны осознать их смелость и вызванное ими упрощение основ физики.

Когда Г. А. Лоренц начинал свою творческую деятельность, электромагнитная теория Максвелла уже добилась признания. Но основы этой теории были исключительно сложными, и это не позволяло выявлять ее основные черты с достаточной ясностью. Понятие поля отвергло, правда, представления о дальности действия, но электрическое и магнитное поля мыслились еще не как исходные сущности, а как состояния континуальной весомой материи. Вследствие этого электрическое поле казалось раздвоенным на поле вектора электрической напряженности и поле вектора диэлектрического смещения. В простейшем случае оба эти поля были связаны диэлектрической постоянной, но в принципе они считались независимыми и изучались как независимые реальности. Аналогично обстояло дело и с магнитным полем. В соответствии с этой основной концепцией пустое пространство рассматривалось как частный случай весомой материи, в котором отношение между напряженностью и смещением проявляется особенно просто. Из такого представления вытекало, в частности, что электрические и магнитные поля нужно было считать зависимыми от состояния движения материи, являющейся носителем этих полей.

Четкие понятия об этой господствовавшей тогда трактовке электродинамики Максвелла можно получить, изучив работу Генриха Герца по электродинамике движущихся тел.

В такой обстановке началась плодотворная деятельность Г. А. Лоренца. Он с исключительной последовательностью ставил в основу своих исследований следующие гипотезы: носителем электромагнитного поля является пустое пространство. В нем существует лишь *один* вектор электрического поля и лишь *один* вектор магнитного поля. Это поле создается атомарными электрическими зарядами, которые, в свою очередь, испытывают ponderomotorное воздействие со стороны поля. Связь между электродвижущим полем и весомой материей существует лишь потому, что элементарные электрические заряды тесно связаны с атомарными частицами, из которых состоит материя. Для последней действительны законы Ньютона.

На таким образом упрощенном фундаменте Лоренц построил полную теорию всех известных тогда электромагнитных явлений, в том числе электродинамику движущихся тел. Его работа обладает последовательностью, ясностью и красотой, которые редко достигаются в экспериментальных науках. Единственное явление, которое не удалось объяснить этим путем полностью, т. е. без допущения дополнительных допущений, был знаменитый опыт Майкельсона — Морли. Было бы бессмысленно считать, что этот опыт мог привести к специальной теории относительности без локализации электромагнитного поля в пустом пространстве. Существенным шагом было как раз приведение к уравнениям Максвелла в пустоте, или — как тогда говорили — в эфире.

Г. А. Лоренц нашел даже носящие его имя «преобразования Лоренца», не заметив, правда, что они обладают свойствами группы. Для него уравнения Максвелла в пустом пространстве были действительны только в определенной системе координат, которая казалась преимущественной благодаря своей неподвижности относительно всех остальных систем координат. Это было поистине парадоксальное положение, потому что теория, казалось, ограничивает инерциальную систему сильнее, чем классическая механика. Это обстоятельство, которое с эмпирической точки зрения представлялось совершенно необоснованным, должно было привести к специальной теории относительности.

Так как благодаря предупредительности Лейденского университета я нередко подолгу бывал в этом городе, где жил у своего дорогого и незабвенного друга Пауля Эренфеста, мне представилась возможность часто посещать лекции, которые Лоренц регулярно читал для небольшого круга молодых коллег после того, как оставил преподавание. Все, что исходило от этого возвышенного ума, было ясно и красиво, как прекрасное произведение искусства; создавалось впечатление, что все вытекает просто и легко; ни у кого другого мне не приходилось испытывать такого чувства.

Если бы мы, принадлежащие к более молодому поколению, знали бы Лоренца только как человека возвышенного ума, и то наше восхищение и уважение к нему были бы единодушными. Но этим

далеко не исчерпывается то, что я чувствую, когда думаю о нем. Для меня лично он значил больше, чем все остальные люди, которых я встречал на своем жизненном пути.

Он легко и со спокойной уверенностью владел собой так же, как владел физикой и математическим аппаратом. Необычное отсутствие у него человеческих слабостей не действовало унижающе на близких. Каждый чувствовал его превосходство, но оно никого не подавляло, потому что он, хотя хорошо знал людей и человеческие отношения, всегда проявлял доброжелательность ко всем. Он был исключительно добросовестным, но не придавал какому-либо делу преувеличенного значения. От этого Лоренца предохранял тонкий юмор, который отражался и в его глазах, и в его улыбке. Этому соответствовало и то, что несмотря на всю преданность научному познанию, его все-таки пронизывало сознание невозможности до конца проникнуть в сущность вещей. Только в более зрелые годы я смог полностью оценить эту полускептическую, полупокорную точку зрения.

У меня не хватает слов, чтобы исчерпать тему этой небольшой статьи. Поэтому я хотел бы привести еще два кратких высказывания Лоренца, особенно сильно подействовавших на меня.

«Я счастлив, что принадлежу к нации¹, слишком маленькой для того, чтобы совершать большие глупости».

Человеку, который в беседе, происходившей во время первой мировой войны, пытался его убедить, что только жестокость и насилье вершат судьбы, он ответил: «Возможно, что вы и правы, но в таком мире я не хотел бы жить».

¹ Лоренц был голландцем. — Прим. ред.

**К 410-й ГОДОВЩИНЕ
СО ДНЯ СМЕРТИ КОПЕРНИКА**
(По случаю мемориального вечера
в Колумбийском университете.
Нью-Йорк, декабрь 1953 г.)

Сегодня мы с радостью и благодарностью чтим память человека, который больше, чем кто-либо другой на Западе, способствовал освобождению умов от церковных оков и научных догм.

Правда, уже в древней Греции некоторые ученые были убеждены, что Земля не является неким естественным центром мира. Но такое понимание Вселенной не получило в древности действительного признания. Аристотель и греческая астрономическая школа продолжали тяготеть к геоцентрической концепции; едва ли кто-нибудь в ней сомневался.

Сегодня нелегко постигнуть, какая независимость мысли, редкая интуиция и мастерское владение астрономическими фактами нужны были для доказательства превосходства гелиоцентрических воззрений. Это великое достижение Коперника не только проложило дорогу к современной астрономии; оно способствовало решительному изменению отношения людей к космосу. Раз было признано, что Земля является не центром мира, а лишь одной из самых малых планет, то и иллюзорное представление о центральной роли самого человека стало несостоятельным.

Таким образом, своими трудами и величием своей личности Коперник призывал людей быть скромными.

Ни одна нация не гордилась тем, что такой человек вырос в ней. Для национальной гордости это скорее легкая слабость, которая вполне оправдана перед лицом человека с такой внутренней независимостью, как Коперник.

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Вот я здесь сижу и пишу на 68-м году жизни что-то вроде собственного некролога. Делаю я это не только потому, что меня уговорили; я и сам думаю, что показать своим ищущим собратьям, какими представляются, в исторической перспективе, собственные стремления и искания, — дело хорошее. После некоторого размышления я, однако, почувствовал, как неполна и несовершенна должна оказаться такая попытка. Ведь как бы ни была коротка и ограничена трудовая жизнь, как бы ни преобладали в ней ошибки и блуждания, все же отобрать и изложить то, что этого заслуживает, — задача нелегкая; когда человеку 67 лет, то он не тот, каким был в 50, 30 и 20 лет. Всякое воспоминание подкрашено тем, что есть человек сейчас, а нынешняя точка зрения может ввести в заблуждение. Это соображение могло бы отпугнуть. Но, с другой стороны, из собственных переживаний можно почерпнуть многое такое, что недоступно сознанию другого.

Еще будучи довольно скороспелым молодым человеком, я живо осознал ничтожество тех надежд и стремлений, которые гонят сквозь жизнь большинство людей, не давая им отдыха. Скоро я увидел и жестокость этой гонки, которая, впрочем, в то время прикрывалась тщательнее, чем теперь, лицемерием и красивыми словами. Каждый вынуждался существованием своего желудка к участию в этой гонке. Участие это могло привести к удовлетворению желудка, но никак не к удовлетворению всего человека как мыслящего и чувствующего существа. Выход отсюда указывался прежде всего религией, которая ведь насаждается всем детям традиционной машиной воспитания. Таким путем я, хотя и был сыном совсем нерелигиозных (еврейских) родителей, пришел к глубокой религиозности, которая, однако, уже в возрасте 12 лет резко оборвалась. Чтение научно-популярных книжек привело меня вскоре к убеждению, что в библейских рассказах многого не может быть верным. Следствием этого было прямо-таки фанатическое

свободомысле, соединенное с выводами, что молодежь умышленно обманывается государством; это был потрясающий вывод. Такие переживания породили недоверие ко всякого рода авторитетам и скептическое отношение к верованиям и убеждениям, жившим в окружавшей меня тогда социальной среде. Этот скептицизм никогда меня уже не оставлял, хотя и потерял свою остроту впоследствии, когда я лучше разобрался в причинной связи явлений.

Для меня ясно, что утраченный таким образом религиозный рай молодости представлял первую попытку освободиться от пут «только личного», от существования, в котором господствовали желания, надежды и примитивные чувства.

Там, вовне, был этот большой мир, существующий независимо от нас, людей, и стоящий перед нами как огромная вечная загадка, доступная, однако, по крайней мере отчасти, нашему восприятию и нашему разуму. Изучение этого мира манило как освобождение, и я скоро убедился, что многие из тех, кого я научился ценить и уважать, нашли свою внутреннюю свободу и уверенность, отдавшись целиком этому занятию. Мысленный охват, в рамках доступных нам возможностей, этого внеличного мира представлялся мне наполовину сознательно, наполовину бессознательно как высшая цель. Те, кто так думал, будь то мои современники или люди прошлого, вместе с выработанными ими взглядами, были моими единственными и неизменными друзьями. Дорога к этому раю была не так удобна и привлекательна, как дорога к религиозному раю, но она оказалась надежной, и я никогда не жалел, что по ней пошел.

То, что я сейчас сказал, верно только в известном смысле, подобно тому как рисунок, состоящий из немногих штрихов, только в ограниченном смысле может передать сложный предмет, с его запутанными мелкими подробностями. Если данная личность особенно ценит остро отточенную мысль, то эта сторона ее существа может выделяться ярче других ее сторон и в большей степени определять ее духовный мир. Может тогда случиться, что в ретроспективном взгляде эта личность усмотрит систематическое саморазвитие там, где фактические переживания чередовались в калейдоскопическом беспорядке. В самом деле, многообразие внешних обстоятельств, в соединении с тем, что в каждый данный момент думаешь только об одном, вводит в сознательную жизнь каждого человека своего рода атомную структуру. В развитии человека моего склада поворотная точка достигается тогда, когда главный интерес жизни понемногу отрывается от мгновенного и личного и все больше и больше концентрируется в стремлении мысленно охватить природу вещей. С этой точки зрения вышеприведенные схематические заметки содержат верного столько, сколько вообще может быть сказано в таких немногих словах.

Что значит, в сущности, «думать»? Когда при восприятии ощущений, идущих от органов чувств, в воображении всплывают кар-

тины-воспоминания, то это еще не значит «думать». Когда эти картины становятся в ряд, каждый член которого пробуждает следующий, то и это еще не есть мышление. Но когда определенная картина встречается во многих таких рядах, то она, в силу своего повторения, начинает служить упорядочивающим элементом для таких рядов, благодаря тому, что она связывает ряды, сами по себе лишенные связи. Такой элемент становится орудием, становится понятием. Мне кажется, что переход от свободных ассоциаций или «мечтаний» к мышлению характеризуется той, более или менее доминирующей, ролью, какую играет при этом «понятие». Само по себе не представляется необходимым, чтобы понятие соединялось с символом, действующим на органы чувств и воспроизводимым (со словом); но если это имеет место, то мысль может быть сообщена другому лицу.

По какому же праву, спросит теперь читатель, оперирует этот человек так бесцеремонно и кустарно с идеями в такой проблематической области, не делая притом ни малейшей попытки что-либо доказать? Мое оправдание: всякое наше мышление — того же рода; оно представляет собой свободную игру с понятиями. Обоснование этой игры заключается в достижимой при помощи нее возможности обозреть чувственные восприятия. Понятие «истины» к такому образованию еще совсем не применимо; это понятие может, по моему мнению, быть введено только тогда, когда имеется налицо условное соглашение относительно элементов и правил игры.

Для меня не подлежит сомнению, что наше мышление протекает в основном минуя символы (слова) и к тому же бессознательно. Если бы это было иначе, то почему нам случается иногда «удивляться», притом совершенно спонтанно, тому или иному восприятию (Erlebnis)? Этот «акт удивления», по-видимому, наступает тогда, когда восприятие вступает в конфликт с достаточно установленным в нас миром понятий. В тех случаях, когда такой конфликт переживается остро и интенсивно, он в свою очередь оказывает сильное влияние на наш умственный мир. Развитие этого умственного мира представляет собой в известном смысле преодоление чувства удивления — непрерывное бегство от «удивительного», от «чуда»¹.

Чудо такого рода я испытал ребенком 4 или 5 лет, когда мой отец показал мне компас. То, что эта стрелка веда себя так определенно, никак не подходило к тому роду явлений, которые могли найти себе место в моем неосознанном мире понятий (действие через прикосновение). Я помню еще и сейчас — или мне кажется, что я помню, — что этот случай произвел на меня глубокое и длительное впечатление. За вещами должно быть что-то еще, глубоко скрытое. Человек так не реагирует на то, что он видит с малых

¹ Слова «чудо» и «удивление» имеют в немецком языке один и тот же корень «Wunder». — *Прим. перев.*

лет. Ему не кажется удивительным падение тел, ветер и дождь, он не удивляется на луну и на то, что она не падает, не удивляется различию между живым и неживым.

В возрасте 12 лет я пережил еще одно чудо совсем другого рода: источником его была книжечка по евклидовой геометрии на плоскости, которая попала мне в руки в начале учебного года. Там были утверждения, например, о пересечении трех высот треугольника в одной точке, которые хотя и не были сами по себе очевидны, но могли быть доказаны с уверенностью, исключавшей как будто всякие сомнения. Эта ясность и уверенность произвели на меня неописуемое впечатление. Меня не беспокоило то, что аксиомы должны быть приняты без доказательства. Вообще мне было вполне достаточно, если я мог в своих доказательствах опираться на такие положения, справедливость которых представлялась мне бесспорной. Я помню, например, что теорема Пифагора была мне показана моим дядей еще до того, как в мои руки попала священная книжечка по геометрии. С большим трудом мне удалось «доказать» эту теорему при помощи подобных треугольников; при этом мне казалось, однако, «очевидным», что отношение сторон прямоугольного треугольника должно полностью определяться одним из его острых углов. Вообще мне казалось, что доказывать нужно только то, что не «очевидно» в этом смысле. И предметы, с которыми имеет дело геометрия, не казались мне другой природы, чем «видимые и осязаемые» предметы, т. е. предметы, воспринимаемые органами чувств. Это примитивное понимание основано, конечно, на том, что бессознательно учитывалась связь между геометрическими понятиями и наблюдаемыми предметами (длина — твердый стержень и т. п.). Возможно, что это понимание лежит в основе известной кантовской постановки вопроса относительно возможности «синтетического суждения а priori».

Хотя это выглядело так, будто путем чистого размышления можно получить достоверные сведения о наблюдаемых предметах, но такое «чудо» было основано на ошибке. Все же тому, кто испытывает это «чудо» в первый раз, кажется удивительным самый факт, что человек способен достигнуть такой степени надежности и чистоты в отвлеченном мышлении, какую нам впервые показали греки в геометрии.

Раз я позволил себе прервать начатый с грехом пополам некролог, я уже не буду стесняться выразить здесь в нескольких фразах свое гносеологическое кредо, хотя кое-что из этого было уже попутно сказано ранее. Эти мои убеждения складывались медленно и сложились много позднее; они не соответствуют тем установкам, которые у меня были, когда я был моложе.

Я вижу, с одной стороны, совокупность ощущений, идущих от органов чувств; с другой стороны, совокупность понятий и предложений, записанных в книгах. Связи понятий и предложений между собою — логического характера; задача логического



Альберт Эйнштейн

мышления сводится исключительно к установлению соотношений между понятиями и предложениями по твердым правилам, которыми занимается логика. Понятия и предложения получают смысл, или «содержание», только благодаря их связи с ощущениями. Связь последних с первыми — чисто интуитивная и сама по себе не логической природы. Научная «истина» отличается от пустого фантазирования только степенью надежности, с которой можно провести эту связь или интуитивное сопоставление, и ничем иным. Система понятий есть творение человека, как и правила синтаксиса, определяющие ее структуру. Хотя системы понятий сами по себе логически совершенно произвольны, но их связывает то, что они, во-первых, должны допускать возможно надежное (интуитивное) и полное сопоставление с совокупностью ощущений; во-вторых, они должны стремиться обойтись наименьшим числом логически независимых элементов (основных понятий и аксиом), т. е. таких понятий, для которых не дается определений, и таких предложений, для которых не дается доказательств.

Предложение верно, если оно выведено внутри некоторой логической системы по принятым правилам. Содержание истины в системе определяется надежностью и полнотой ее соответствия с совокупностью ощущений. Вернее, предложение заимствует свою «истинность» из запаса истины, содержащегося в системе, его заключающей.

Замечание к историческому развитию. Юм (Hume) ясно понял, что некоторые понятия, например понятие причинности, не могут быть выведены из опытных данных логическим путем. Кант, убежденный в том, что без некоторых понятий обойтись нельзя, считал эти понятия в их принятой форме необходимыми предпосылками всякого мышления и отличал их от понятий эмпирического происхождения. Я же уверен, что это разграничение ошибочно и не охватывает естественным образом задачу. Все понятия, даже и ближайшие к ощущениям и переживаниям, являются с логической точки зрения произвольными положениями, точно так же, как и понятие причинности, о котором в первую очередь и шла речь.

Возвращаясь теперь к некрологу. В возрасте 12—16 лет я ознакомился с элементами математики, включая основы дифференциального и интегрального исчисления. При этом, на мое счастье, мне попались книги, в которых обращалось не слишком много внимания на логическую строгость, зато хорошо была выделена везде главная мысль. Все это занятие было поистине увлекательно; в нем были взлеты, по силе впечатления не уступавшие «чуду» элементарной геометрии, — основная идея аналитической геометрии, бесконечные ряды, понятие дифференциала и интеграла. Мне посчастливилось также получить понятие о главнейших результатах и методах естественных наук по очень хорошему популярному изданию, в котором изложение почти везде ограничивалось каче-

ственной стороной вопроса (бернштейновские естественнонаучные книги для народа — труд в 5—6 томов); книги эти я читал, не переводя дыхания. К тому времени, когда я в возрасте 17 лет поступил в Цюрихский политехникум в качестве студента по физике и математике, я уже был немного знаком и с теоретической физикой.

Там у меня были прекрасные преподаватели (например, Гурвиц, Минковский), так что, собственно говоря, я мог бы получить солидное математическое образование. Я же большую часть времени работал в физической лаборатории, увлеченный непосредственным соприкосновением с опытом. Остальное время я использовал главным образом для того, чтобы дома изучать труды Кирхгофа, Гельмгольца, Герца и т. д. Причиной того, что я до некоторой степени пренебрегал математикой, было не только преобладание естественнонаучных интересов над интересами математическими, но и следующее своеобразное чувство. Я видел, что математика делится на множество специальных областей и каждая из них может занять всю отпущенную нам короткую жизнь. И я увидел себя в положении буриданова осла, который не может решить, какую же ему взять охапку сена. Дело было, очевидно, в том, что моя интуиция в области математики была недостаточно сильна, чтобы уверенно отличить основное и важное от остальной учености, без которой еще можно обойтись. Кроме того, и интерес к исследованию природы, несомненно, был сильнее; мне как студенту не было еще ясно, что доступ к более глубоким принципиальным проблемам в физике требует тончайших математических методов. Это стало мне выясняться лишь постепенно, после многих лет самостоятельной научной работы. Конечно, и физика была разделена на специальные области, и каждая из них могла поглотить короткую трудовую жизнь, так и не удовлетворив жажды более глубокого познания. Огромное количество недостаточно увязанных эмпирически фактов действовало и здесь подавляюще. Но здесь я скоро научился выскивать то, что может повести в глубину, и отбрасывать все остальное, все то, что перегружает ум и отвлекает от существенного. Тут была, однако, та загвоздка, что для экзамена нужно было напихивать в себя — хочешь не хочешь — всю эту премудрость. Такое принуждение настолько меня запугивало, что целый год после сдачи окончательного экзамена всякое размышление о научных проблемах было для меня отравлено. При этом я должен сказать, что мы в Швейцарии страдали от такого принуждения, удушающего настоящую научную работу, значительно меньше, чем страдают студенты во многих других местах. Было всего два экзамена; в остальном можно было делать более или менее то, что хочешь. Особенно хорошо было тому, у кого, как у меня, был друг, аккуратно посещавший все лекции и добросовестно обрабатывавший их содержание. Это давало свободу в выборе занятия вплоть до нескольких месяцев перед экза-

меном, свободу, которой я широко пользовался; связанную же с ней нечистую совесть я принимал как неизбежное, притом значительно меньшее, зло. В сущности, почти чудо, что современные методы обучения еще не совсем удушили святую любознательность, ибо это нежное растение требует наряду с поощрением прежде всего свободы — без нее оно неизбежно погибает. Большая ошибка думать, что чувство долга и принуждение могут способствовать находить радость в том, чтобы смотреть и искать. Мне кажется, что даже здоровое хищное животное потеряло бы жадность к еде, если бы удалось с помощью бича заставить его непрерывно есть, даже когда оно не голодно, и особенно если принудительно предлагаемая еда не им выбрана.

Обратимся теперь к физике, какой она представлялась в то время. Несмотря на то, что в отдельных областях она процветала, в принципиальных вещах господствовал догматический застой. В начале (если таковое было) бог создал ньютоновы законы движения вместе с необходимыми массами и силами. Этим все и исчерпывается; остальное должно получиться дедуктивным путем, в результате разработки надлежащих математических методов. Опираясь на эту основу и, в особенности, применяя уравнения в частных производных, XIX столетие дало так много, что это должно вызывать удивление всякого мыслящего человека. Ньютон, вероятно, первый продемонстрировал в своей теории распространения звука плодотворность метода дифференциальных уравнений в частных производных. Эйлер создал уже основы гидродинамики. Но более детальное построение механики дискретных масс как основы всей физики было достижением XIX в. На студента наибольшее впечатление производило не столько построение самого аппарата механики и решение сложных задач, сколько достижения механики в областях, на первый взгляд совсем с ней не связанных: механическая теория света, которая рассматривала свет как волновое движение квазитвердого упругого эфира, и прежде всего кинетическая теория газов. Здесь следует упомянуть независимость теплоемкости одноатомных газов от атомного веса, вывод уравнения состояния газа и его связь с теплоемкостью, а главное — численную зависимость между вязкостью, теплопроводностью и диффузией газов, которая давала и абсолютные размеры атома. Эти результаты служили одновременно подтверждением механики как основы физики и подтверждением атомной гипотезы, которая тогда уже твердо укрепилась в химии. Однако в химии играли роль только отношения атомных масс, а не их абсолютные величины, поэтому там атомную теорию можно было рассматривать скорее как наглядную аналогию, а не как познание действительного строения материи. Независимо от этого, глубочайший интерес вызывало и то, что статистическая теория классической механики была в состоянии вывести основные законы термодинамики; по существу, это было сделано уже Больцманом.

Нельзя поэтому удивляться, что физики прошлого века видели в классической механике незыблемое основание для всей физики и даже для всего естествознания; они неустанно пытались обосновать на механике и максвелловскую теорию электромагнетизма, медленно пробивавшую себе дорогу. Максвелл и Герц в своем сознательном мышлении также считали механику надежной основой физики, хотя в исторической перспективе следует признать, что именно они и подорвали доверие к механике как основе основ всего физического мышления. Эрнст Мах в своей истории механики потряс эту догматическую веру; на меня — студента — эта книга оказала глубокое влияние именно в этом отношении. Я вижу действительное величие Маха в его неподкупном скепсисе и независимости; в мои молодые годы на меня произвела сильное впечатление также и гносеологическая установка Маха, которая сегодня представляется мне в существенных пунктах несостоятельной. А именно: он недостаточно подчеркнул конструктивный и спекулятивный характер всякого мышления, в особенности научного мышления. Вследствие этого он осудил теорию как раз в тех ее местах, где конструктивно-спекулятивный характер ее выступает неприкрыто, например в кинетической теории.

Прежде чем приняться за критику механики как основы физики, нужно сначала высказать несколько общих положений о точках зрения, или критериях, с которых вообще можно критиковать физические теории. Первый критерий очевиден: теория не должна противоречить данным опыта. Но насколько очевидным кажется это требование само по себе, настолько тонким оказывается его применение. Дело в том, что часто, если не всегда, можно сохранить данную общую теоретическую основу, если только приспособлять ее к фактам при помощи более или менее искусственных дополнительных предположений. Во всяком случае, в этом первом критерии речь идет о проверке теоретической основы на имеющемся опытным материале.

Во втором критерии речь идет не об отношении к опытному материалу, а о предпосылках самой теории, о том, что можно было бы кратко, хотя и не вполне ясно, назвать «естественностью» или «логической простотой» предпосылок (основных понятий и основных соотношений между ними). Этот критерий, точная формулировка которого представляет большие трудности, всегда играл большую роль при выборе между теориями и при их оценке. Речь идет здесь не просто о каком-то перечислении логически независимых предпосылок (если таковое вообще возможно однозначным образом), а о своего рода взвешивании и сравнении несоизмеримых качеств. Далее, из двух теорий с одинаково «простыми» основными положениями следует предпочесть ту, которая сильнее ограничивает возможные а priori качества систем (т. е. содержит наиболее определенные утверждения). Относительно «области применимости» теорий мне можно здесь не говорить ничего, поскольку мы

рассматриваем только такие теории, предметом которых является вся совокупность физических явлений.

Второй критерий можно кратко характеризовать как критерий «внутреннего совершенства» теории, тогда как первый относится к ее «внешнему оправданию». К «внутреннему совершенству» теории я причисляю также и следующее: теория представляется нам более ценной тогда, когда она не является логически произвольным образом выбранной среди приблизительно равноценных и аналогично построенных теорий.

Недостаточную определенность моих утверждений в двух последних абзацах я не буду оправдывать недостатком отведенного мне в печати места; я прямо признаю, что так сразу я не могу, а может быть, и вообще не в состоянии, заменить эти намеки точными определениями. Однако я считаю, что более точная формулировка возможна. Во всяком случае, мы видим, что между «авгурами» большей частью наблюдается полное согласие в суждении о «внутреннем совершенстве» теорий и в особенности о степени их «внешнего оправдания».

Переходим теперь к критике механики как основы физики.

С точки зрения первого критерия (проверка на опыте) включение волновой оптики в механическую картину мира должно было вызывать серьезные сомнения. Если считать, что свет должен рассматриваться как волновое движение в упругом теле (в эфире), то это тело должно быть всепроникающей средой. В силу поперечности световых волн среда эта должна быть в основном подобна твердому телу, однако она должна быть несжимаемой, чтобы продольные волны не существовали. Этот эфир должен был вести рядом с обычной материей призрачное существование, поскольку он как будто не оказывал никакого сопротивления движению «весомых» тел. Чтобы объяснить показатели преломления прозрачных тел, а также процессы испускания и поглощения света, пришлось бы принять путанные взаимодействия между двумя родами материи; это не только не было выполнено, но даже никто этого серьезно и не пробовал.

Далее, электромагнитные силы заставили ввести электрические массы, которые хотя и не обладали заметной инертностью, но оказывали друг на друга воздействие; в отличие от силы тяготения это взаимодействие имело полярный характер.

Причиной, в конце концов побудившей физиков отказаться после долгих колебаний от веры в возможность построить всю физику на основе ньютоновой механики, — была электродинамика Фарадея — Максвелла. Эта теория, вместе с опытами Герца, ее подтвердившими, показала, что существуют электромагнитные процессы, по существу своему оторванные от всякой весомой материи, а именно волны, представляющие собой колебания электромагнитных «полей» в пустом пространстве. Кто хотел сохранить механику как основу физики, тот должен был дать механи-

ческое толкование уравнениям Максвелла. Над этим и стали трудиться усерднейшим образом, но совершенно бесплодно, тогда как самые уравнения во все большей степени выявляли свою плодотворность. Люди привыкли оперировать с этими полями как с самостоятельными реальностями, не вдаваясь в их механическую природу. Так, почти незаметно, взгляд на механику как на основу физики был оставлен; это произошло потому, что приспособление механики к опытным фактам оказалось безнадежным. С тех пор существуют две системы элементарных понятий: с одной стороны, взаимодействующие на расстоянии материальные точки, а с другой — непрерывное поле. Это состояние физики, в котором отсутствует единая ее основа, является как бы переходным; при всей его неудовлетворительности оно далеко еще не преодолено...

Теперь о критике механики как основы физики с точки зрения второго, «внутреннего» критерия. При современном состоянии науки, когда механический фундамент уже оставлен, такого рода критика может иметь лишь методический интерес. Однако она весьма пригодна в качестве примера такой аргументации, которая в будущем должна при выборе между теориями играть тем большую роль, чем дальше отстоят их основные понятия и аксиомы от непосредственно наблюдаемого; при таких обстоятельствах сопоставление выводов теории с опытом становится все сложнее и затруднительнее. Здесь следует в первую очередь упомянуть одно соображение Маха, которое, впрочем, было совершенно ясно уже и Ньютону (опыт с ведром). С точки зрения чисто геометрического описания, все «жесткие» системы отсчета являются в логическом отношении равноправными. Однако уравнения механики (и уже первый закон Ньютона) справедливы лишь в некоторых из этих систем отсчета, а именно в «инерциальных» системах, составляющих особый класс. При этом характер системы отсчета, как материального тела, оказывается несущественным. Необходимость брать именно инерциальную систему отсчета должна быть поэтому обусловлена чем-то лежащим вне тех предметов (масс, расстояний), о которых идет речь в теории. В качестве такого определяющего обстоятельства Ньютон ввел «абсолютное пространство» как некоего вездесущего активного участника всех механических процессов. Под «абсолютным» Ньютон, очевидно, понимает «не подверженное влиянию масс и их движений». Положение усугубляется тем, что предполагается существование бесконечного множества инерционных систем, движущихся друг относительно друга равномерно и без вращения, причем эти системы отсчета предполагаются выделенными среди всех остальных жестких систем отсчета.

По мнению Маха, в действительно рациональной теории инертность должна, подобно другим ньютоновским силам, происходить от взаимодействия масс. Это мнение я долгое время считал в принципе правильным. Оно неявным образом предполагает, однако,

что теория, на которой все основано, должна принадлежать тому же общему типу, как и ньютонова механика: основными понятиями в ней должны служить массы и взаимодействия между ними. Между тем нетрудно видеть, что такая попытка решения не вяжется с духом теории поля.

Тем не менее маховская критика сама по себе вполне обоснованна. Это особенно ясно видно из следующей аналогии. Представим себе людей, строящих механику; пусть при этом они знают только небольшую часть земной поверхности и не имеют возможности видеть звезды. Они будут склонны приписывать вертикальному измерению пространства (направление ускорения при падении) особые физические свойства. На этом основании они придут к заключению, что поверхность земли преимущественно горизонтальна. Положим, что они не поддаются соображению, что пространство в геометрическом отношении изотропно и что поэтому нельзя строить основные физические законы так, чтобы из них следовало наличие привилегированного направления; эти люди, вероятно, будут склонны утверждать (подобно Ньютону), что вертикаль абсолютна, что это показывает опыт и с этим приходится считаться. Выделение вертикалей перед всеми другими направлениями совершенно аналогично выделению инерциальных систем перед другими жесткими координатными системами.

Приведем теперь дальнейшие аргументы, которые тоже относятся к вопросу о внутренней простоте и естественности механики. Если принять без критических сомнений понятия пространства (включая геометрию) и времени, то еще нет оснований возражать против введения сил дальнего действия в качестве исходных понятий, хотя понятие дальнего действия и не согласуется с теми идеями, которые люди себе вырабатывают на основании грубого повседневного опыта. Зато имеется другое соображение, благодаря которому понимание механики как основы физики представляется нам примитивным.

В основном имеются два закона:

- 1) Закон движения.
- 2) Выражение для силы (или для потенциальной энергии).

Закон движения точен, но он бессодержателен, пока не дано выражение для силы. Написание этого выражения связано, однако, с широким произволом, особенно если отбросить не очевидное само по себе требование, чтобы силы зависели только от самих координат (а, например, не от их производных по времени).

В рамках такой теории произвольным является и то, что действие сил тяготения (и электрических сил), выходящих из одной точки, определяется потенциальной функцией ($\frac{1}{r}$).

Дополнительное замечание: уже давно известно, что эта функция является центрально-симметрическим решением простейшего (инвариантного по отношению к вращениям) дифференциального урав-

нения $\Delta\phi = 0$; было бы естественным считать это признаком того, что эта функция должна определяться из некоторого пространственного закона, чем устранялся бы произвол в выборе закона для сил. Собственно говоря, это первый результат, который мог бы навести на мысль об отходе от теории дальнего действия. Однако развитие в этом направлении, начатое Фарадеем, Максвеллом и Герцем, наступило лишь позже, под давлением опытных фактов.

Мне бы хотелось также указать на внутреннюю несимметрию теории, проявляющуюся в том обстоятельстве, что входящая в закон движения инертная масса входит и в выражение для сил тяготения, но не в выражения для других сил. Наконец, я бы хотел указать на то, что разделение энергии на две существенно различные части — кинетическую и потенциальную энергию — должно восприниматься как нечто неестественное; Герц считал это таким неудобством, что в своей последней работе даже попытался освободить механику от понятия потенциальной энергии (т. е. силы)...

Довольно об этом. Прости меня, Ньютон; ты нашел единственный путь, возможный в твоё время для человека величайшей научной творческой способности и силы мысли. Понятия, созданные тобой, и сейчас еще остаются ведущими в нашем физическом мышлении, хотя мы теперь и знаем, что если мы будем стремиться к более глубокому пониманию взаимосвязей, то мы должны будем заменить эти понятия другими, стоящими дальше от сферы непосредственного опыта.

«И это некролог?» — может спросить удивленный читатель. По сути дела — да, хотелось бы мне ответить. Потому что главное в жизни человека моего склада заключается в том, что он думает и как он думает, а не в том, что он делает или испытывает. Значит, в некрологе можно в основном ограничиться сообщением тех мыслей, которые играли значительную роль в моих стремлениях. Теория производит тем большее впечатление, чем проще ее предпосылки, чем разнообразнее предметы, которые она связывает, и чем шире область ее применения. Отсюда глубокое впечатление, которое произвела на меня классическая термодинамика. Это единственная физическая теория общего содержания, относительно которой я убежден, что в рамках применимости ее основных понятий она никогда не будет опровергнута (к особому сведению принципиальных скептиков).

Самым увлекательным предметом во времена моего учения была теория Максвелла. Переход от сил дальнего действия к полям, как основным величинам, делал эту теорию революционной. То, что оптика нашла себе место в теории электромагнетизма, установившей связь между скоростью света и абсолютной электрической и магнитной системой мер, а также связавшей коэффициент преломления с диэлектрической постоянной и приведшей к качественному соотношению между коэффициентом отражения и металличе-

ческой проводимостью тела, — все это было для меня как откровение. Помимо перехода к теории поля, т. е. к выражению элементарных законов при помощи дифференциальных уравнений, Максвеллу понадобился всего один гипотетический шаг — введение электрического тока смещения в пустоте и в диэлектриках с его магнитным действием; это нововведение было почти что продиктовано свойствами самих дифференциальных уравнений. В этой связи я не могу удержаться, чтобы не отметить удивительное внутреннее сходство между сочетанием Фарадей — Максвелл и сочетанием Галилей — Ньютон. Первый в каждой паре интуитивно схватывал соотношения, а второй их точно формулировал и применял количественно.

Проникновение в сущность электромагнитной теории затруднялось в те времена следующим своеобразным обстоятельством. Электрические и магнитные «силы поля» рассматривались наравне со «смещениями» как первичные величины, а пустое пространство считалось частным случаем диэлектрика. Носителем поля считалась *материя* (вещество), а не *пространство*. А это подразумевало, что носитель поля обладает свойством иметь скорость, что, конечно, должно было быть справедливым и для «пустоты» (эфир). Электродинамика движущихся тел Герца всецело основана на этой принципиальной установке.

Большой заслугой Г. А. Лоренца было то, что он произвел здесь переворот, притом самым убедительным образом. Согласно Лоренцу, принципиально существует только поле в пустоте. Вещество, которое предполагается атомистичным, является единственным носителем зарядов; между материальными частицами находится пустое пространство — носитель электромагнитного поля, которое создается положением и скоростью точечных зарядов, сидящих на частицах. Диэлектрические свойства, проводимость и т. п. обусловлены исключительно характером механических связей между частицами, из которых состоят тела. Частицы-заряды создают поле, которое в свою очередь действует на заряды частиц. Соответствующие силы обуславливают движение частиц согласно законам Ньютона. Если сравнить это с системой Ньютона, то изменение заключается в следующем: силы дальнего действия заменяются полем, описывающим также и излучение. Тяготение большей частью в расчет не принимается вследствие его относительной малости; однако оно может быть учтено путем обогащения структуры поля и соответственного расширения максвелловских уравнений для поля. Физик нынешнего поколения сочтет завоеванную Лоренцом точку зрения единственно возможной, а в то время это был поразительно смелый шаг, без которого дальнейшее развитие было бы невозможно.

Если посмотреть на эту фазу развития теории критически, то прежде всего бросается в глаза ее двойственность, состоящая в том, что материальная точка в ньютоновом смысле и поле, как

континуум, употребляются рядом в качестве элементарных понятий. Кинетическая энергия и энергия поля представляются как принципиально разные вещи. Это кажется тем более неудовлетворительным, что согласно теории Максвелла магнитное поле движущегося электрического заряда представляло инерцию. Почему же не *вся* инерция? Тогда имела бы только энергия поля, и частица была бы лишь областью особенно большой плотности этой энергии поля. Тогда можно было бы надеяться, что понятие материальной точки вместе с уравнениями движения частицы может быть выведено из уравнений поля — и мешающая двойственность была бы устранена.

Г. А. Лоренц это прекрасно понимал. Но уравнения Максвелла не позволяли установить условия равновесия электричества, составляющего одну частицу. Только другие нелинейные уравнения поля могли бы, может быть, это сделать. Однако еще не было метода, который бы позволил находить такие уравнения, не вдаваясь в самый авантюрный произвол. Во всяком случае, можно было надеяться найти новую, надежную основу для всей физики, продвигаясь шаг за шагом по пути, столь успешно намеченному Фарадеем и Максвеллом.

Таким образом, революцию, начатую введением поля, никак нельзя было считать оконченной. Случилось так, что на пороге двух веков независимо от этого переворота разразился еще один кризис основных понятий, важность которого внезапно дошла до сознания людей благодаря исследованиям Макса Планка о тепловом излучении (1900). История этого кризиса тем более замечательна, что на нее, по крайней мере в ее начальной стадии, не влияли никакие из ряда вон выходящие открытия экспериментального характера.

На основе термодинамических соображений Кирхгоф пришел к выводу, что плотность энергии и спектральный состав излучения, заключенного в полость с непрозрачными стенками температуры T , не зависит от природы этих стенок. Это означало, что плотность ρ монохроматического излучения есть универсальная функция частоты ν и абсолютной температуры T . Таким образом, возникла интересная задача определения этой функции $\rho(\nu, T)$. Что можно было получить теоретическим путем относительно этой функции? Согласно теории Максвелла, излучение должно оказывать на стенки давление, определяемое полной плотностью энергии. Отсюда Больцман вывел чисто термодинамическим путем, что общая плотность энергии излучения $(\int \rho d\nu)$ пропорциональна T^4 . Тем самым он нашел теоретическое обоснование для эмпирической закономерности, найденной уже ранее Стефаном, или, иначе говоря, он связал ее с основами теории Максвелла. После этого В. Вин при помощи остроумного термодинамического рассуждения, в котором также использовалась теория Максвелла, на-

шел, что универсальная функция ρ от двух переменных ν и T должна иметь вид

$$\rho \approx \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right),$$

где $f(\nu/T)$ означает универсальную функцию единственной переменной ν/T . Было ясно, что теоретическое определение этой универсальной функции f имеет фундаментальное значение — это и была та задача, которая стояла перед Планком. Тщательные измерения привели к довольно точному эмпирическому определению функции f . Сначала Планку удалось, опираясь на эти эмпирические измерения, найти для этой функции представление, довольно хорошо их передававшее, а именно

$$\rho = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1},$$

где h и k — две универсальные постоянные; первая из них привела к теории квант. Эта формула выглядит благодаря своему знаменателю несколько странно. Допускает ли она теоретическое обоснование? Планк действительно нашел обоснование, несовершенство которого вначале были скрыты; это последнее обстоятельство было настоящим счастьем для развития физики. Если эта формула верна, то она позволяет с помощью теории Максвелла вычислить среднюю энергию E квазимонохроматического осциллятора, находящегося в поле излучения,

$$E = \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}.$$

Планк предпочел попробовать теоретически вычислить эту последнюю величину. В этой попытке термодинамика уже не помогала, точно так же, как не помогала и теория Максвелла. Но одно свойство этой формулы сильно обнадеживало. А именно, для высоких значений температуры (при постоянном ν) формула давала выражение

$$E = kT.$$

Это — то же самое выражение, какое дает кинетическая теория газов для средней энергии материальной точки, способной совершать упругие колебания в одном измерении. Кинетическая теория дает

$$E = \frac{R}{N} T,$$

где R — газовая постоянная, а N — число молекул в грамм-молекуле; эта постоянная связана с абсолютной величиной атома. Если приравнять оба выражения, то получим

$$N = \frac{R}{k}.$$

Значит, одна из постоянных формулы Планка в точности дает

истинную величину атома. Численное значение удовлетворительно совпадало с определениями N , правда не очень точными, сделанными на основе кинетической теории газов.

Это было большим успехом, что ясно сознавал Планк. Однако тут имеется и обратная сторона, довольно неприятная, которую, к счастью, Планк сразу не заметил. А именно, рассуждение требует, чтобы соотношение $E = kT$ было справедливо и для малых температур. Но тогда пропала бы и формула Планка и ее постоянная h . Правильный вывод из существующей теории был бы, следовательно, такой: или средняя кинетическая энергия осциллятора получается неверно из теории газов, что означало бы опровержение механики; или же средняя энергия осциллятора получается неверно из теории Максвелла, что означало бы опровержение этой последней. При этих обстоятельствах самым вероятным является то, что обе теории верны только в пределе, а в остальном неверны; так это и есть на самом деле, как мы увидим в дальнейшем. Если бы Планк пришел к этому выводу, то он, может быть, не сделал бы своего великого открытия, потому что у его рассуждения исчезло бы самое основание.

Вернемся к рассуждению Планка. На основании кинетической теории газов Больцман нашел, что энтропия равна, с точностью до постоянного множителя, логарифму «вероятности» рассматриваемого состояния. Этим он выяснил сущность процессов, «необратимых» в смысле термодинамики. Напротив того, с молекулярно-механической точки зрения все процессы обратимы. Если назвать состояние, определенное в смысле молекулярной теории, состоянием микроскопическим или, короче, микросостоянием, а состояние, описанное термодинамически, — макросостоянием, то к каждому макроскопическому состоянию будет относиться великое множество (Z) микросостояний. Тогда Z является мерой вероятности данного макросостояния. Эта мысль представляется крайне важной еще и потому, что применимость ее не ограничивается микроскопическим описанием на основе механики. Это заметил Планк и применил принцип Больцмана к системе, состоящей из очень большого числа резонаторов с одинаковой частотой ν . Макроскопическое состояние задано полной энергией колебания всех резонаторов; макросостояние задано, если дана (для данного момента) энергия каждого отдельного резонатора. Для того чтобы число микросостояний, относящихся к одному макросостоянию, получилось конечным, Планк разделил полную энергию на большое, но конечное число одинаковых элементов энергии ϵ и задал вопрос: сколькими способами можно распределить между резонаторами эти элементы энергии? Логарифм этого числа дает тогда энтропию, а с нею (термодинамическим путем) и температуру системы. Планк получил свою формулу, взяв для элементов энергии ϵ величину $\epsilon = h\nu$. Решающим является здесь то обстоятельство, что результат получается только, если брать для ϵ определен-

ное конечное значение ϵ , значит, не переходить к пределу $\epsilon = 0$. Такая форма рассуждения затушевывает то, что оно противоречит механической и электродинамической основе, на которую опирается вывод во всем остальном. В действительности, однако, в этом выводе неявно предполагается, что отдельные резонаторы могут поглощать и испускать энергию только «квантами» величины $h\nu$. Это означает, что энергия механической колебательной системы, так же как и энергия излучения, может передаваться только такими квантами — наперекор законам механики и электродинамики. Здесь противоречие с динамикой было фундаментальным, тогда как противоречие с электродинамикой могло быть и не таким глубоким. А именно, выражение для плотности энергии излучения является совместным с уравнениями Максвелла, но оно не является необходимым следствием этих уравнений. Что это выражение правильно дает важные средние значения, явствует хотя бы из того, что основанные на нем законы Стефана — Больцмана и Вина согласуются с опытом.

Все это стало мне ясно уже вскоре после появления основной работы Планка, так что я, хотя и не имел замены для классической механики, все-таки мог видеть, к каким следствиям ведет этот закон теплового излучения как для фотоэлектрического эффекта и других родственных ему явлений, связанных с превращениями лучистой энергии, так и для теплоемкости тел, в частности твердых тел. Но все мои попытки приспособить теоретические основы физики к этим результатам потерпели полную неудачу. Это было так, точно из-под ног ушла земля и нигде не было видно твердой почвы, на которой можно было бы строить. Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточно, чтобы позволить Бору — человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем — найти главные законы спектральных линий и электронных оболочек атомов, включая их значение для химии. Это кажется мне чудом и теперь. Это — наивысшая музыкальность в области мысли.

Мои личные интересы в эти годы были направлены не столько на отдельные следствия из результатов Планка, как бы важны они ни были; главным моим вопросом был следующий. Какие общие выводы позволяет сделать формула излучения относительно структуры излучения и вообще относительно электромагнитной основы физики? Прежде чем говорить об этом подробнее, я должен коротко упомянуть о некоторых исследованиях, относящихся к броуновскому движению и родственным ему предметам (явления флуктуации) и основанных главным образом на классической кинетической теории. Не будучи знакомым с появившимися ранее исследованиями Больцмана и Гиббса, которые по существу исчерпывают вопрос, я развил статистическую механику и основанную на ней молекулярно-кинетическую теорию термодинамики. При этом главной моей целью было найти такие факты, которые воз-

можно надежнее устанавливали бы существование атомов определенной конечной величины.

Не зная, что наблюдения над «броуновским движением» давно известны, я открыл, что атомистическая теория приводит к существованию доступного наблюдению движения взвешенных микроскопических частиц. Наиболее простой вывод основывался на следующих соображениях. Если молекулярно-кинетическая теория в принципе верна, то суспензия видимых частиц должна, подобно раствору молекул, обладать осмотическим давлением, подчиняющимся газовым законам. Это осмотическое давление зависит от истинных размеров молекул, т. е. от числа молекул в грамм-эквиваленте. Если плотность суспензии неравномерна, то имеющееся в силу этого пространственное непостоянство осмотического давления вызывает выравнивающее диффузионное движение, которое можно вычислить из известной подвижности частиц. С другой стороны, тот же диффузионный процесс можно рассматривать как результат беспорядочных смещений взвешенных частиц под действием теплового движения, причем величина смещений наперед неизвестна. Приравнявая значения диффузионного потока, полученные обоими путями, приходим к количественному выражению статистического закона для этих перемещений, т. е. к закону броуновского движения. Согласие этих выводов с опытом, а также сделанное Планком определение истинной величины молекулы из закона излучения (для высоких температур) убедило многочисленных тогда скептиков (Оствальд, Мах) в реальности атомов. Предубеждение этих ученых против атомной теории можно несомненно отнести за счет их позитивистской философской установки. Это — интересный пример того, как философские предубеждения мешают правильной интерпретации фактов даже ученым со смелым мышлением и с тонкой интуицией. Предрассудок, который сохранился и до сих пор, заключается в убеждении, будто факты сами по себе, без свободного теоретического построения, могут и должны привести к научному познанию. Такой самообман возможен только потому, что нелегко осознать, что и те понятия, которые благодаря проверке и длительному употреблению кажутся непосредственно связанными с эмпирическим материалом, на самом деле свободно выбраны.

Успех теории броуновского движения снова ясно показал, что классическая механика неизменно дает надежные результаты тогда, когда ее применяют к движениям, для которых можно пренебречь высшими производными от скорости по времени. На признании этого факта можно построить сравнительно простой метод, позволяющий кое-что узнать из формулы Планка о структуре излучения. А именно, можно заключить следующее. Свободно двигающееся (перпендикулярно к своей плоскости) зеркало, отражающее квазимонохроматически, должно совершать в пространстве, наполненном излучением, нечто вроде броуновского движения

со средней кинетической энергией, равной $\frac{1}{2} (R/N)T$ (R — константа уравнения состояния для одной грамм-молекулы, N — число молекул в грамм-молекуле, T — абсолютная температура). Если бы излучение не испытывало локальных флуктуаций, то зеркало постепенно остановилось бы, так как благодаря его движению от его передней стороны отражается больше излучения, чем от задней. Но зеркало должно подвергаться действию флуктуаций испытываемого им давления в силу того, что волновые пучки, составляющие излучение, интерферируют между собой; эти флуктуации могут быть вычислены из теории Максвелла. Такое вычисление показывает, однако, что этих флуктуаций давления недостаточно (особенно при малых плотностях излучения) для того, чтобы сообщить зеркалу среднюю кинетическую энергию $\frac{1}{2} (R/N)T$. Чтобы получить такое значение энергии, нужно принять, что существуют флуктуации давления другого рода, не вытекающие из теории Максвелла. Эти флуктуации соответствуют предположению, что энергия излучения состоит из неделимых квантов энергии $h\nu$ (с импульсами $h\nu/c$, где c — скорость света), обладающих точечной локализацией, причем эти кванты отражаются целиком, не раздробляясь. Приведенное рассуждение показало самым наглядным и прямым образом, что планковым квантам приходится приписывать своего рода непосредственную реальность; следовательно, в отношении энергии излучение должно обладать своего рода молекулярной структурой, что, конечно, противоречит теории Максвелла. Применяя к излучению другие рассуждения, основанные непосредственно на больцмановом соотношении между вероятностью и энтропией (причем вероятность приравнивается статистической частоте во времени), можно прийти к тому же результату. Эта двойственная природа излучения (и материальных частиц) является фундаментальным свойством реальности, которое квантовая механика истолковала остроумным и поразительно успешным образом. Почти все современные физики считают это толкование в основном окончательным, мне же оно кажется лишь временным выходом; несколько замечаний об этом следует дальше.

Благодаря такого рода рассуждениям уже вскоре после 1900 г., т. е. вскоре после основополагающей работы Планка, мне стало ясно, что ни механика, ни термодинамика не могут претендовать на полную точность (за исключением предельных случаев). Постепенно я стал отчаиваться в возможности докопаться до истинных законов путем конструктивных обобщений известных фактов. Чем дольше и отчаяннее я старался, тем больше я приходил к заключению, что только открытие общего формального принципа может привести нас к надежным результатам. Образцом представлялась мне термодинамика. Там общий принцип был дан в предположении: законы природы таковы, что построить *perpetuum mobile* (первого и второго рода) невозможно. Но как же найти общий принцип, подобный этому? Такой принцип я получил после десяти

лет размышлений из парадокса, на который я натолкнулся уже в 16 лет. Парадокс заключается в следующем. Если бы я стал двигаться вслед за лучом света со скоростью c (скорость света в пустоте), то я должен был бы воспринимать такой луч света как покоящееся, переменное в пространстве электромагнитное поле. Но ничего подобного не существует; это видно как на основании опыта, так и из уравнений Максвелла. Интуитивно мне казалось ясным с самого начала, что с точки зрения такого наблюдателя все должно совершаться по тем же законам, как и для наблюдателя, неподвижного относительно Земли. В самом деле, как же первый наблюдатель может знать или установить, что он находится в состоянии быстрого равномерного движения?

Можно видеть, что в этом парадоксе уже содержится зародыш частной теории относительности. Сейчас, конечно, всякий знает, что все попытки удовлетворительно разъяснить этот парадокс были обречены на неудачу до тех пор, пока аксиома об абсолютном характере времени и одновременности оставалась укоренившейся, хотя и неосознанной в нашем мышлении. Установить наличие этой аксиомы и признать ее произвольность, в сущности, уже означает решить проблему. Критическому мышлению, необходимому для того, чтобы нащупать эту центральную точку, сильно способствовало, в частности, чтение философских трудов Давида Юма и Эрнста Маха.

Необходимо было составить себе ясное представление о том, что означают в физике пространственные координаты и время некоторого события. Физическое толкование пространственных координат предполагало наличие жесткого тела отсчета (система отсчета), которое, к тому же, должно находиться в более или менее определенном состоянии движения (инерциальная система). При заданной инерциальной системе координаты означали результаты определенных измерений жесткими (неподвижными) стержнями. (Следует постоянно иметь в виду, что предположение о том, что жесткие стержни в принципе существуют, естественно напрашивается из повседневного опыта, но по существу является произвольным.) При таком толковании пространственных координат вопрос о справедливости евклидовой геометрии становится проблемой физической.

Для того чтобы аналогично толковать время некоторого события, необходимо средство для измерения промежутков времени (таким является идущий детерминированным образом периодический процесс, осуществляемый системой достаточно малых пространственных размеров). Часы, закрепленные неподвижно относительно инерциальной системы, определяют местное время. Совокупность местных времен всех пространственных точек составляет «время», относящееся к выбранной инерциальной системе, если, кроме того, дан способ «сверить» все эти часы между собой. Очевидно, что *a priori* совсем не обязательно, чтобы определенные та-

ким образом «времена» различных инерциальных систем совпадали между собой. Несовпадение давно было бы замечено, если бы свет не казался (благодаря большой величине c) средством для установления абсолютной одновременности — по крайней мере в практике повседневного опыта.

Предположения о (принципиальном) существовании (идеальных или совершенных) масштабов и часов не независимы друг от друга. В самом деле, если считать, что предположение о постоянстве скорости света в пустоте не приводит к противоречиям, то световой сигнал, отражающийся туда и обратно от зеркал на концах твердого стержня, представляет собой идеальные часы.

Упомянутый выше парадокс можно формулировать так. Согласно употребляемым в классической физике правилам преобразования пространственных координат и времени событий при переходе от одной инерциальной системы к другой, ниже следующие два положения: 1) постоянство скорости света, 2) независимость законов (значит, в частности, и закона постоянства скорости света) от выбора инерциальной системы (частный принцип относительности) несовместны между собой (хотя каждое в отдельности подтверждается опытом).

В основе частной теории относительности лежит признание того, что положения 1) и 2) между собой совместны, если для пересчета координат и времен событий применять правила преобразования нового рода («преобразование Лоренца»). При данном физическом толковании координат и времени это утверждение означает не просто условный шаг, но включает в себе определенные гипотезы о действительном поведении движущихся масштабов и часов — гипотезы, которые могут быть подтверждены или же опровергнуты на опыте.

Общий принцип частной теории относительности содержится в постулате: законы физики инвариантны относительно преобразований Лоренца (дающих переход от одной инерциальной системы к любой другой инерциальной системе). Это есть ограничительный принцип для законов природы, который можно сравнить с лежащим в основе термодинамики ограничительным принципом несуществования *perpetuum mobile*.

Скажем сперва несколько слов об отношении теории к «четырёхмерному пространству». Весьма распространенной ошибкой является мнение, будто частная теория относительности как бы открыла, или же вновь ввела, четырёхмерность физического многообразия (континуума). Конечно, это не так. Четырёхмерное многообразие пространства и времени лежит в основе также и классической механики. Только в четырёхмерном континууме классической физики «сечения», соответствующие постоянному значению времени, обладают абсолютной (т. е. не зависящей от выбора системы отсчета) реальностью. Тем самым четырёхмерный континуум естественно распадается на трёхмерный и на одномерный (время),

так что четырёхмерное рассмотрение не навязывается как необходимое. Частная же теория относительности, наоборот, создает формальную зависимость между тем, как должны входить в законы природы пространственные координаты, с одной стороны, и временная координата, с другой.

Важный вклад Минковского в теорию состоит в следующем. До исследования Минковского для проверки инвариантности физического закона приходилось выполнять над ним преобразование Лоренца до конца. Минковскому же удалось ввести такой аппарат, что сама математическая форма закона уже обеспечивает его инвариантность относительно преобразований Лоренца. Создав четырёхмерное тензорное исчисление, Минковский дал для четырёхмерного пространства то, что дает обыкновенное векторное исчисление для трех пространственных измерений. Он также показал, что преобразование Лоренца является не чем иным, как поворотом координатной системы в четырёхмерном пространстве (если не считать отличия в знаке, обусловленного особым характером времени).

Сделаем теперь критическое замечание о теории в том виде, как она охарактеризована выше. Можно заметить, что теория вводит (помимо четырёхмерного пространства) два рода физических предметов, а именно: 1) масштабы и часы, 2) все остальное, например электромагнитное поле, материальную точку и т. д. Это в известном смысле нелогично; собственно говоря, теорию масштабов и часов следовало бы выводить из решений основных уравнений (учитывая, что эти предметы имеют атомную структуру и движутся), а не считать ее независимой от них. Обычный образ действия имеет, однако, свое оправдание, поскольку с самого начала ясна недостаточность принятых постулатов для обоснования теории масштабов и часов. Эти постулаты не настолько сильны, чтобы из них можно было вывести достаточно полные уравнения для физических процессов. Если вообще не отказываться от физического толкования координат (что само по себе было бы возможно), то лучше уж допустить такую непоследовательность, но с обязательством избавиться от нее на дальнейшей стадии развития теории. Однако этот грех нельзя узаконивать до такой степени, чтобы разрешать, например, пользоваться представлением о расстоянии, как о физической сущности особого рода, существенно отличной от других физических величин (сводить физику к геометрии и т. п.).

Выясним теперь, каковы те окончательно установленные истины, которыми физика обязана частной теории относительности.

1) Одновременности отдаленных событий не существует; значит, нет и непосредственного дальнего действия в смысле ньютоновой механики. Правда, по этой теории можно было бы ввести дальнего действия, распространяющиеся со скоростью света, но это было бы совершенно искусственным; дело в том, что в теории такого рода не может быть разумного выражения для принципа энергии. Представляется поэтому неизбежным описывать физическую реальность

непрерывными функциями точки в пространстве. В силу этого материальная точка уже не может считаться основным понятием теории.

2) Закон сохранения импульса и закон сохранения энергии сливаются в один единственный закон. Инертная масса замкнутой системы тождественна с ее энергией, так что масса перестает быть самостоятельным понятием.

Замечание. Скорость света c является одной из величин, входящих в физические уравнения в качестве «универсальной постоянной». Однако если взять за единицу времени вместо секунды то время, за которое свет проходит 1 см, то c больше не будет входить в уравнения. В этом смысле можно сказать, что постоянная c является лишь кажущейся универсальной постоянной.

Общезвестно и всеми принято, что, кроме того, можно исключить из физики другие универсальные постоянные, если вместо грамма и сантиметра ввести подходящие «естественные» единицы (например, массу и радиус электрона).

Если представить себе это выполненным, то в основные уравнения физики будут входить только лишь «безразмерные» постоянные. Относительно этих последних мне бы хотелось высказать одно предложение, которое нельзя обосновать пока ни на чем другом, кроме веры в простоту и понятность природы. Предложение это — следующее: таких произвольных постоянных не существует. Иначе говоря, природа устроена так, что ее законы в большей мере определяются уже чисто логическими требованиями настолько, что в выражения этих законов входят только постоянные, допускающие теоретическое определение (т. е. такие постоянные, что их численных значений нельзя менять, не разрушая теории).

Частная теория относительности обязана своим возникновением уравнениям Максвелла для электромагнитного поля. И обратно, только частная теория относительности дает уравнениям Максвелла удовлетворительное формальное толкование. Уравнения Максвелла представляют собой простейшие инвариантные относительно преобразования Лоренца уравнения поля, которые только можно написать для кососимметричного тензора, связанного с векторным полем. Все это было бы хорошо, если бы мы не знали из квантовых явлений, что теория Максвелла не передает энергетических свойств излучения. Но для решения вопроса о том, как именно следует видоизменить теорию Максвелла (причем видоизменение должно быть естественным), частная теория относительности не дает достаточных указаний. И на вопрос Маха «почему инерциальные системы физически выделены относительно других систем отсчета?» эта теория тоже не дает ответа.

Тот факт, что частная теория относительности представляет лишь первый шаг в необходимом развитии, стал мне ясен лишь при попытке представить в рамках этой теории и тяготение. В классической механике, истолкованной в духе теории поля, по-

тенциал тяготения представляется как скалярное поле (простейшая теоретическая возможность поля с одной единственной составляющей). Такая скалярная теория тяготения может быть легко сделана инвариантной по отношению к группе преобразований Лоренца. Итак, естественной представляется следующая программа: полное физическое поле состоит из скалярного поля (тяготение) и векторного поля (электромагнитное поле); дальнейшие открытия могли бы заставить ввести еще более сложные поля, но пока об этом можно было бы не беспокоиться.

Возможность реализации этой программы представлялась, однако, сомнительной с самого начала. Дело в том, что теория должна была соединять в себе следующие вещи:

1) из общих соображений частной теории относительности было ясно, что инертная масса физической системы при увеличении полной энергии (в частности, при увеличении кинетической энергии) должна возрастать;

2) из очень точных опытов (в особенности из опытов Этвеша с крутильными весами) было эмпирически известно с очень большой точностью, что тяжелая масса тела в точности равна его инертной массе.

Из (1) и (2) следовало, что вес системы зависит вполне определенным и известным образом от ее полной энергии. Если теория этого не давала или давала только с натяжкой, то ее надо было отбросить. Проще всего это условие можно выразить так: при падении системы в данном поле силы тяжести ускорение не зависит от природы падающей системы (а значит, в частности, и от содержащейся в ней энергии).

Однако выяснилось, что в рамках намеченной программы это элементарное положение вещей вообще не может быть учтено надлежащим образом, во всяком случае без натяжки. Это убедило меня в том, что в рамках частной теории относительности нет места для удовлетворительной теории тяготения.

И вот мне пришло в голову: факт равенства инертной и весовой массы или, иначе, тот факт, что ускорение свободного падения не зависит от природы падающего вещества, допускает и иное выражение. Его можно выразить так: в поле тяготения (малой пространственной протяженности) все происходит так, как в пространстве без тяготения, если в нем вместо «инерциальной» системы отсчета ввести систему, ускоренную относительно нее.

Значит, если считать, что поведение тел в ускоренной системе отсчета обусловлено как бы «истинным» полем тяготения (а не только кажущимся), то эту систему отсчета можно считать «инерциальной» с тем же правом, как и первоначальную систему.

Если считать возможными любые гравитационные поля, простирающиеся сколь угодно далеко и не ограниченные предельными условиями, то понятие инерциальной системы становится бессодержательным. Понятие «ускорение по отношению к простран-

ству» теряет тогда всякий смысл, а с ним и принцип инерции, причем исчезает также парадокс Маха.

Таким образом, равенство инертной и весомой массы приводит вполне естественно к мысли о том, что основное требование частной теории относительности (инвариантность законов по отношению к преобразованию Лоренца) слишком узко, т. е. что нужно постулировать инвариантность законов и относительно нелинейных преобразований координат в четырехмерном континууме.

Это произошло в 1908 г. Почему понадобилось еще 7 лет, чтобы построить общую теорию относительности? Главная причина заключается в следующем: не так легко освободиться от представления, что координаты имеют прямой метрический смысл. Переворот совершался примерно следующим образом.

Мы исходим из пустого пространства без поля, в том виде, как оно рассматривается — в инерциальной системе отсчета — в частной теории относительности. Это есть простейший, физически возможный случай. Вообразим себе теперь инерциальную систему, введенную так, что она движется относительно инерциальной системы в одном направлении (в трехмерном смысле) с постоянным ускорением (соответственно определенным). По отношению к этой системе возникнет статическое параллельное поле тяготения. При этом систему отсчета можно взять жесткую с трехмерной евклидовой метрикой. Но в равноускоренной системе, в которой имеется статическое поле, часы идут не так, как одинаково расположенные часы в неподвижной системе. Из этого частного примера уже видно, что непосредственно метрическое значение координат теряется, если вообще допускать нелинейные преобразования координат. Но делать это необходимо, если стремиться к тому, чтобы равенство тяжелой и инертной массы было заложено уже в основах теории, и если стремиться преодолеть парадокс Маха относительно инерциальных систем.

Но раз приходится отказаться от того, чтобы придавать координатам непосредственный метрический смысл (разность координат равна измеряемой длине или промежутку времени), то нельзя уже обойтись без признания равноценности всех координатных систем, получаемых путем непрерывных преобразований.

Сообразно этому общая теория относительности исходит из следующего основного положения. Законы природы должны выражаться такими уравнениями, которые были бы ковариантны относительно группы непрерывных преобразований координат. Эта группа становится здесь, таким образом, на место группы преобразований Лоренца частной теории относительности; эта последняя группа является подгруппой первой группы.

Само по себе это требование еще не может, конечно, служить достаточно определенной исходной точкой для вывода основных уравнений физики. Прежде всего, можно даже оспаривать, содержит ли это требование действительное ограничение для физических

законов; в самом деле, если данный закон постулирован сперва только для некоторых координатных систем, то его всегда можно переформулировать так, чтобы новая формулировка имела уже общековариантный вид. Кроме того, с самого начала ясно, что существует бесчисленное множество уравнений поля, допускающих такую общековариантную формулировку. Выдающееся эвристическое значение общего принципа относительности состоит вот в чем: он приводит нас к отысканию тех систем уравнений, которые, будучи общековариантными, являются в то же время наиболее простыми; среди этих систем мы и должны искать уравнения поля, выражающие свойства физического пространства. Поля, получаемые одно из другого преобразованиями координат, отражают одну и ту же действительность.

Для искателя в этой области главным вопросом является следующий: какого математического характера будут величины (функции координат), через которые выражаются физические свойства пространства («структура»)? И уже потом: каким уравнениям удовлетворяют эти величины?

На эти вопросы мы сегодня отнюдь не можем еще ответить с уверенностью. Путь, по которому я пошел при первой формулировке общей теории относительности, может быть характеризован следующим образом. Если мы и не знаем, каковы те переменные (та структура поля), которыми следует описывать физическое пространство, то нам достоверно известен один частный случай: «свободное от поля» пространство частной теории относительности. Такое пространство характеризуется тем, что в надлежаще выбранной системе координат относящееся к двум соседним точкам выражение

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2 \quad (1)$$

представляет измеримую величину (квадрат расстояния), следовательно, имеет реальный физический смысл. Отнесенная к произвольной системе эта величина выражается так:

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k, \quad (2)$$

где значки пробегают значения от 1 до 4. Величины g_{ik} образуют симметричный тензор. Если после выполнения преобразования над выражением (полем) (1) получаются g_{ik} с исчезающими первыми производными по координатам, то по отношению к этой системе координат существует как бы гравитационное поле (в смысле вышеизложенного рассуждения), а именно гравитационное поле совсем частного вида. Благодаря римановым исследованиям n -мерных метрических пространств это особое поле может быть инвариантно характеризовано следующим образом:

1) Риманов тензор кривизны R_{iklm} , образованный из коэффициентов метрики (2), равен нулю.

2) По отношению к инерциальной системе (в которой справедливо выражение (1)) траектория материальной точки есть прямая, а тем самым есть экстремаль (геодезическая линия). Последнее же утверждение представляет такую характеристику закона движения, которая опирается на выражение (2).

Общий закон физического пространства должен быть обобщением только что написанного закона. Тут я предположил, что имеются две ступени обобщения:

а) чистое поле тяготения,

б) общее поле (в котором встречаются и величины, каким-то образом соответствующие электромагнитному полю).

Случай а) характеризовался тем, что хотя поле все еще может быть представлено римановой метрикой (2) с соответствующим симметричным тензором, но при этом не существует представления вида (1) (кроме как в бесконечно малом). Это значит, что в случае а) тензор Римана не исчезает. Однако ясно, что в этом случае должны быть справедливы уравнения поля, выражающие закон, который представляет собой обобщение (ослабление) прежнего закона. Если потребовать, чтобы эти уравнения тоже были второго порядка и линейные во вторых производных, то этим условиям удовлетворяют только уравнения

$$0 = R_{kl} = g^{im} R_{iklm},$$

получаемые из предыдущих однократным свертыванием. Только эти уравнения и могли рассматриваться как уравнения поля в случае а). Далее, естественно считать, что и в случае а) геодезическая линия по-прежнему дает закон движения материальной точки.

Попытка найти представление для полного поля б) и получить для него уравнения казалась мне в то время бесперспективной и я на нее не отважился. Я предпочел установить для изображения всей физической реальности предварительные формальные рамки. Это было нужно для того, чтобы иметь возможность исследовать, хотя бы предварительно, пригодность основной идеи общей относительности. Происходило это так.

В теории Ньютона можно написать в качестве закона для поля тяготения уравнение

$$\Delta\varphi = 0$$

(где φ — потенциал тяготения), которое должно выполняться в таких местах, где плотность ρ материи равна нулю. В общем случае следовало бы положить

$$\Delta\varphi = 4\pi k\rho \quad (\rho \text{ — плотность массы})$$

(уравнение Пуассона). В релятивистской теории поля тяготения на место $\Delta\varphi$ становится R_{ik} . В правую часть мы должны тогда поставить вместо ρ тоже тензор. Так как мы из частной теории от-

носительности знаем, что (инертная) масса равна энергии, то в правую часть надлежит поставить тензор плотности энергии, точнее, полной плотности энергии, поскольку она не принадлежит чистому полю тяготения. Мы приходим, таким образом, к уравнению поля

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = -\kappa T_{ik}.$$

Второй член в левой части добавлен из формальных соображений, а именно левая часть написана так, что ее расходимость в смысле абсолютного дифференциального исчисления тождественно равна нулю. Правая часть включает в себя все то, что не может быть пока объединено в единой теории поля. Конечно, я ни одной минуты не сомневался в том, что такая формулировка есть только временный выход из положения, предпринятый с целью дать общему принципу относительности какое-то замкнутое выражение. Эта формулировка была ведь, по существу, не более чем теорией поля тяготения, несколько искусственно оторванного от единого поля (Gesamtfeld) еще неизвестной структуры.

В набросанной теории, помимо требования инвариантности уравнений по отношению к группе непрерывных преобразований координат, на безусловное (окончательное) значение может, пожалуй, претендовать только предельный случай чистого поля тяготения и связь этого поля с метрической структурой пространства. Поэтому мы сейчас будем говорить только об уравнениях чистого поля тяготения.

Своеобразием этих уравнений является, с одной стороны, их сложное строение, особенно их нелинейный характер по отношению к переменным поля и их производным, а с другой стороны, их единственность, т. е. та логическая необходимость, с которой группа преобразований определяет вид этих сложных уравнений. Если бы мы остановились на частной теории относительности, т. е. на инвариантности относительно группы Лоренца, то уравнения поля $R_{ik} = 0$ остались бы инвариантными и в рамках этой более узкой группы. Но с точки зрения более узкой группы, прежде всего, не было бы никакого основания считать, что тяготение должно описываться такой сложной системой величин (структурой), какой является симметричный тензор g_{ik} . Если бы даже и можно было найти для этого достаточные причины, то оказалось бы, что существует несметное число уравнений поля, построенных из величин g_{ik} , которые все ковариантны относительно преобразований Лоренца (но не относительно общей группы). Даже если бы случайно удалось из всех мыслимых законов, инвариантных в группе Лоренца, угадать как раз тот, которому принадлежит более широкая группа, то все-таки мы бы не достигли той ступени познания, какую дает нам общий принцип относительности. Ибо с точки зрения группы Лоренца два решения, связанные нели-

нейным преобразованием координат, должны были бы считаться физически различными, что неверно, так как с точки зрения общей группы они дают только два различных представления одного и того же поля.

Еще одно общее замечание о структуре поля и группе. Ясно, что, вообще говоря, теория представляется нам тем совершеннее, чем проще положенная в ее основу «структура» поля и чем шире та группа, относительно которой уравнения поля инвариантны. Но эти два требования, очевидно, вступают друг с другом в конфликт. Согласно частной теории относительности (группа Лоренца) можно, например, написать ковариантное уравнение уже для простейшей мыслимой структуры (скалярное поле), тогда как в общей теории относительности (более широкая группа непрерывных преобразований координат) инвариантные уравнения поля существуют только для более сложной структуры, а именно для симметричного тензора. В обоснование того, что в физике нужно требовать инвариантности относительно более широкой группы, мы привели физические доводы; с чисто математической точки зрения я не вижу необходимости приносить более простую структуру поля в жертву широте группы¹.

Группа общей относительности впервые приводит к тому, что наиболее простой инвариантный закон уже не будет линейным и однородным в переменных поля и их производных. Это — обстоятельство фундаментальной важности, и вот по какой причине. Если уравнения поля линейны (и однородны), то сумма двух решений снова будет решением; это имеет место, например, для максвелловских уравнений поля в пустом пространстве. В такой (линейной) теории уравнений поля недостаточно для вывода закона взаимодействия между объектами, которые описываются (каждый в отдельности) решениями системы уравнений поля. Поэтому в прежних теориях необходимы были, наряду с уравнениями поля, особые уравнения, определяющие движение материальных объектов под действием поля. Правда, первоначально в релятивистской теории тяготения постулировался, наряду с законами для поля и независимо от него, также и закон движения (геодезическая линия). Но впоследствии выяснилось, что не нужно, да и нельзя, вводить закон движения независимо, а что он неявно содержится в законе для поля тяготения.

Сущность этого, довольно сложного положения вещей можно представить себе более наглядно следующим образом. Одна единственная неподвижная материальная точка изображается полем тяготения, которое конечно и регулярно везде, за исключением того места, где находится сама материальная точка; в этом месте

¹ Оставаться при более узкой группе и одновременно брать более сложную структуру поля (ту же, как в общей теории относительности) означает наивную непоследовательность. Грех остается грехом, хотя бы его совершали мужи, в остальном почтенные.

поле имеет особенность. Если же путем интегрирования уравнений поля вычислить поле, соответствующее двум неподвижным материальным точкам, то оно будет иметь, помимо особенностей в материальных точках, также и особую линию, соединяющую материальные точки между собой. Но можно задать движение материальных точек так, чтобы определяемое ими поле тяготения вне материальных точек нигде не имело особенностей. Это будут как раз те движения, которые в первом приближении описываются законами Ньютона. Таким образом, можно сказать: массы движутся так, что уравнения поля допускают решения, не имеющие особенностей в пространстве вне масс. Это свойство уравнений тяготения непосредственно связано с их нелинейностью, а она в свою очередь обусловлена более широкой группой преобразований.

Тут можно было бы, впрочем, высказать такое возражение. Если допускаются особенности в местах материальных точек, то какое тогда имеется оправдание для запрещения особенностей в остальном пространстве? Это возражение было бы оправдано в том случае, если бы уравнения тяготения могли рассматриваться как уравнения единого полного поля. При существующем же положении нам приходится говорить, что поле материальной частицы может рассматриваться как чистое поле тяготения с тем меньшим правом, чем ближе мы подходим к самой частице. Если бы мы имели уравнения для единого полного поля, то нужно было бы требовать, чтобы и самые частицы могли быть представлены как решения полных уравнений поля, *нигде* не имеющие особенностей. И только тогда общая теория относительности стала бы замкнутой теорией.

Прежде чем переходить к вопросу о завершении общей теории относительности, я должен высказаться о занимаемой мною позиции по отношению к той физической теории, которая из всех физических теорий нашего времени достигла наибольших успехов. Я имею в виду статистическую квантовую механику, которая приобрела стройную логическую форму около 25 лет тому назад (Шредингер, Гейзенберг, Дирак, Борн). Это единственная современная теория, дающая стройное объяснение тому, что мы знаем относительно квантового характера микромеханических процессов. Эта теория, с одной стороны, и теория относительности, с другой, обе в известном смысле считаются верными, хотя слияние этих теорий не удалось до сих пор, несмотря на все усилия. С этим, должно быть, и связано то, что среди современных физиков-теоретиков имеются совершенно различные мнения о том, как будет выглядеть теоретический фундамент будущей физики. Будет ли это теория поля? Будет ли это теория, в основном, статистическая? Я скажу здесь кратко о том, как я об этом думаю.

Физика есть стремление осознать сущее как что-то такое, что мыслится независимым от восприятия. В этом смысле говорят

о «физически реальном». В доквантовой физике не было сомнений, как это следует понимать. В теории Ньютона реальность представлялась материальными точками в пространстве и во времени, в теории Максвелла — полем в пространстве и во времени. В квантовой механике это менее ясно. Если спросить: представляет ли функция ψ квантовой теории какое-то реальное положение вещей, реальное в том же смысле как система материальных точек или электромагнитное поле, то люди медлят с простым ответом «да» или «нет». Почему? Функция ψ (в определенный момент времени) выражает следующее: какова вероятность того, что определенная физическая величина q (или p) окажется в определенном заданном интервале, если я буду ее измерять в момент t ? Здесь вероятность должна рассматриваться как величина, доступная опытному определению, т. е. как величина безусловно «реальная». Определить ее я смогу, если я очень много раз буду создавать ту же самую функцию ψ и каждый раз буду измерять q . А как же обстоит дело с отдельным измерением q ? Обладала ли соответствующая индивидуальная система данным значением q уже до измерения? На этот вопрос в рамках теории нет определенного ответа, потому что ведь измерение есть процесс, означающий конечное внешнее вмешательство в систему; поэтому можно себе представить, что система получает определенное (а именно, измеренное) численное значение q (или p) только в результате самого измерения. Для дальнейшей дискуссии я вообразу себе двух физиков A и B , которые придерживаются различных понятий реального состояния, описываемого функцией ψ .

A . Отдельная система обладает (до измерения) определенным значением q (или p) для всех переменных системы; это и есть то значение, которое устанавливается при измерении этих переменных. Исходя из этого понимания, он объявит: функция ψ не есть исчерпывающее представление реального состояния системы; она выражает только то, что мы знаем о системе из прежних измерений.

B . Отдельная система не обладает (до измерения) определенным значением q (или p). Измеренное значение возникает только благодаря акту измерения с соответствующей этому значению вероятностью, получаемой из функции ψ . Исходя из этого понимания, он объявит (или по крайней мере имеет право объявить): функция ψ есть исчерпывающее представление реального состояния системы.

А теперь мы предложим вниманию обоих этих физиков следующий случай. Пусть имеется система, состоящая (в рассматриваемый момент t) из двух подсистем S_1 и S_2 , которые в этот момент разделены пространственно и не взаимодействуют заметным образом в смысле классической физики. Пусть вся система полностью описывается в смысле квантовой механики известной волновой функцией, а именно функцией ψ_{12} . Все квантисты согласны

между собой в следующем. Если я произведу полное измерение над S_1 , то из результатов измерения и из ψ_{12} я получу вполне определенную волновую функцию ψ_2 системы S_2 . При этом характер ψ_2 зависит от того, какого рода измерение произведено над S_1 . И вот мне кажется, что можно говорить о реальном положении вещей в подсистеме S_2 . Об этом реальном положении вещей мы знаем наперед еще меньше, чем о системе, описанной волновой функцией. Но одно предположение представляется мне бесспорным. Реальное положение вещей (состояние) системы S_2 не зависит от того, что проделывают с пространственно отделенной от нее системой S_1 . Но в зависимости от того, какого рода измерение я произвожу над S_1 , я получаю для второй подсистемы разные ψ_2 ($\psi_2, \psi_2', \dots$). Реальное состояние S_2 должно быть, однако, независимым от того, что происходит в S_1 . Значит, для одного и того же реального состояния S_2 могут быть найдены разные функции ψ_2 (в зависимости от выбора измерения над S_1). (Такого вывода можно было бы избежать только одним из двух способов. Или надо предположить, что измерение на S_1 изменяет (телепатически) реальное состояние S_2 , или же надо отрицать, что вещи, пространственно отделенные друг от друга, вообще могут иметь независимые реальные состояния. То и другое представляется мне совершенно неприемлемым.)

И вот, если физики A и B сочтут это рассуждение верным, то B должен будет отказаться от признания того, что функция ψ является полным описанием реального положения вещей. Потому что в этом случае было бы невозможно, чтобы одному и тому же положению вещей (в S_2) соответствовали две различные волновые функции.

Тогда статистический характер современной теории являлся бы необходимым следствием неполноты описания систем в квантовой механике, и не было бы уже никакого основания считать, что в будущем физика должна будет основываться на статистике.

Мое мнение сводится к тому, что если принять за основу некоторые понятия, заимствованные главным образом из классической механики, то современная квантовая теория может считаться наилучшей формулировкой реальных соотношений. Однако я не думаю, что эта теория является подходящей исходной точкой для будущего развития. Это тот пункт, в котором мои ожидания расходятся с ожиданиями большинства современных физиков, которые убеждены в том, что существенные черты квантовых явлений (как бы скачкообразные и не детерминированные во времени изменения состояния системы, корпускулярные и в то же время волновые свойства элементарных образований, несущих энергию) не могут быть учтены теорией, описывающей реальное состояние вещей непрерывными функциями координат, удовлетворяющими некоторым дифференциальным уравнениям. Они думают также, что таким путем нельзя будет истолковать атомную структуру

вещества и излучения. Они ожидают, что системы дифференциальных уравнений, о которых может идти речь в такой теории, вообще не имеют решений регулярных (не имеющих особенностей) во всем четырехмерном пространстве. Но прежде всего они считают, что, видимо, скачкообразный характер элементарных процессов может быть отображен только теорией, являющейся по существу статистической; в такой теории скачкообразные изменения систем должны учитываться путем непрерывного изменения вероятностей возможных состояний.

Все эти замечания кажутся мне довольно вескими. Но главный вопрос заключается, как мне кажется, в следующем.

Какое направление обещает успех при сегодняшнем состоянии теории? При выборе направления я склонен руководствоваться моим опытом построения теории тяготения. Уравнения этой теории подают, по моему мнению, большие надежды на получение чего-либо точного, чем все остальные уравнения физики. Возьмем для сравнения, например, уравнения Максвелла для пустого пространства. Они являются формулировкой, соответствующей наблюдениям над бесконечно слабыми электромагнитными полями. Это эмпирическое происхождение уже обуславливает их линейную форму; но мы уже указывали, что истинные законы не могут быть линейными. Линейные законы удовлетворяют в отношении решений принципу суперпозиции и, следовательно, ничего не говорят относительно взаимодействий элементарных образований. Истинные законы не могут быть линейными и не могут быть получены из линейных законов. Теория тяготения научила меня и другому: собрание эмпирических фактов, как бы обширно оно ни было, не может привести к установлению таких сложных уравнений. На опыте можно проверить теорию, но нет пути от опыта к построению теории. Уравнения такой степени сложности, как уравнения поля тяготения, могут быть найдены только путем нахождения логически простого математического условия, определяющего вполне или почти вполне вид этих уравнений. Но когда такие достаточно жесткие формальные условия уже установлены, то для построения теории требуется совсем немного фактических данных. В случае уравнений тяготения такими формальными условиями являются: наличие четырех измерений и предположение о том, что структура пространства определяется симметричным тензором. Эти условия вместе с требованием инвариантности относительно группы непрерывных преобразований определяют вид уравнений практически вполне однозначно.

Наша задача состоит в том, чтобы найти уравнения для полного поля. Искомая структура поля должна быть обобщением симметричного тензора. Группа не должна быть более узкой, чем группа непрерывных преобразований координат. Если теперь ввести более сложную структуру, то эта группа уже не будет так жестко определять уравнения, как в случае структуры, ха-

рактеризуемой симметричным тензором. Поэтому прекраснее всего было бы, если бы удалось снова расширить группу, по аналогии с тем шагом, который привел от частной относительности к общей относительности. Я пробовал, в частности, привлечь сюда группу комплексных преобразований координат. Все такие попытки были безуспешны. Я отказался также и от явного или скрытого увеличения числа измерений пространства. Это направление было намечено Калуцой, и оно еще и сейчас имеет своих сторонников (в своем проективном варианте). Мы ограничиваемся четырехмерным пространством и группой непрерывных вещественных преобразований координат. После многих лет тщетных поисков я считаю логически наиболее удовлетворительным решение, набросок которого дается дальше.

Вместо симметричных g_{ik} ($g_{ik} = g_{ki}$) вводится несимметричный тензор g_{ik} . Эта величина составлена из симметричной части s_{ik} и из антисимметричной части a_{ik} , которая может быть вещественной или чисто мнимой. Мы имеем:

$$g_{ik} = s_{ik} + a_{ik}.$$

С точки зрения групповых свойств такое объединение s_{ik} и a_{ik} является искусственным, поскольку каждая из этих величин и в отдельности имеет характер тензора. Однако оказывается, что эти g_{ik} (рассматриваемые как целое) играют в построении новой теории такую же роль, как симметричные g_{ik} в теории поля тяготения.

Это обобщение структуры пространства представляется естественным и с точки зрения наших физических познаний, потому что мы знаем, что электромагнитное поле связано с кососимметричным тензором.

Далее, для теории тяготения существенно, что из симметричных g_{ik} можно образовать скалярную плотность $\sqrt{|g_{ik}|}$, а также и контравариантный тензор g^{ik} согласно определению

$$g_{ik}g^{il} = \delta_k^l \quad (\delta_k^l \text{ — тензор Кронекера}).$$

Образованные таким путем величины, а также тензорные плотности допускают совершенно аналогичное определение и для несимметричных g_{ik} .

Далее, в теории тяготения существенно, что для данного симметричного поля g_{ik} можно определить симметричное в нижних значках поле Γ_{ik}^l , геометрический смысл которого состоит в том, что оно определяет параллельный перенос вектора. Аналогично, для несимметричных g_{ik} можно определить несимметричные Γ_{ik}^l по формуле

$$g_{ik,l} - g_{sk}\Gamma_{il}^s - g_{is}\Gamma_{lk}^s = 0. \quad (\Lambda)$$

Это соотношение совпадает с соответствующим соотношением для симметричных g с той только разницей, что здесь, конечно,

нужно обращать внимание на положение нижних значков в величинах g и Γ .

Как и в вещественной теории, из Γ можно образовать кривизну R_{iklm} и из нее, путем свертывания, кривизну R_{kl} . Наконец, пользуясь некоторым вариационным принципом с соотношениями (A), можно найти совместные между собой уравнения поля:

$$g_s^{ik} = 0 \quad \left[\text{где } g^{ik} = \frac{1}{2} (g^{ik} - g^{ki}) \sqrt{\|g_{ik}\|} \right], \quad (B_1)$$

$$\Gamma_{is}^s = 0 \quad \left[\text{где } \Gamma_{is}^s = \frac{1}{2} (\Gamma_{is}^s - \Gamma_{si}^s) \right], \quad (B_2)$$

$$R_{kl} = 0, \quad (C_1)$$

$$S_{kl,m} + R_{lm,k} + R_{mk,l} = 0. \quad (C_2)$$

При этом каждое из уравнений (B_1) , (B_2) является следствием другого, если выполнено (A). Символ R_{kl} означает симметричную, а символ R_{kl} антисимметричную часть величины R_{ik} .

В случае равенства нулю антисимметричной части g_{ik} эти формулы приводятся к (A) и (C_1) . Это будет случай чистого поля тяготения.

Мне кажется, что эти формулы представляют собой наиболее естественное обобщение уравнений тяготения¹. Проверка их физической пригодности — задача чрезвычайно трудная, потому что здесь приближения ничего не дают. Вопрос в следующем. Какие существуют решения этих уравнений, не имеющие особенностей во всем пространстве?

Этот рассказ достиг своей цели, если он показал читателю, как связаны между собой усилия целой жизни и почему они привели к ожиданиям определенного рода.

¹ Если только вообще можно идти по пути исчерпывающего представления физической реальности на основе понятия континуума, то, по моему мнению, имеется довольно большая вероятность, что предложенная здесь теория подтвердится.

О СПЕЦИАЛЬНОЙ И ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (Общедоступное изложение)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга имеет целью дать возможно точное представление о теории относительности читателям, интересующимся этой теорией с общенаучной, философской точки зрения, но не владеющим математическим аппаратом теоретической физики¹. Предполагается, что читатель имеет общеобразовательную подготовку, а также достаточно терпения и силы воли. Автор приложил много усилий для того, чтобы достигнуть по возможности более ясного и простого изложения основных мыслей в той последовательности и связи, в какой они фактически возникли. В интересах ясности оказались неизбежными повторения; пришлось отказаться от стремления к изящности изложения; я твердо придерживался рецепта гениального теоретика Л. Больцмана — оставить изящество портным и сапожникам. Я, по-видимому, не устал от читателя трудности, лежащие в основах теории. Эмпирические физические основы теории намеренно изложены очень кратко, чтобы читатель, близко не соприкасающийся с физикой, не оказался в положении путника, который из-за деревьев не видит леса. Пусть чтение этой книги доставит читателю несколько радостных часов.

А. Эйнштейн

Декабрь 1916 г.

¹ Математические основания специальной теории относительности можно найти в работах Г. А. Лоренца, А. Эйнштейна, Г. Минковского, вошедших в сб. «Принцип относительности», который входит в «Собрание монографий», издаваемых Б. К. Тойбнером, а также в прекрасной книге М. Лауэ «Принцип относительности» (Фивег, Брауншвейг). Общая теория относительности вместе с необходимой для нее математической теорией инвариантов изложена в брошюре автора «Основы общей теории относительности» (И. А. Барт, 1916); эта брошюра предполагает знакомство читателя со специальной теорией относительности.

О СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

§ 1. Физическое содержание геометрических теорем

Вероятно и ты, дорогой читатель, еще в юности познакомился со стройным зданием геометрии Эвклида и, быть может, скорее с уважением, чем с любовью вспоминаешь об этом величественном сооружении, по ступеням которого многие часы водили тебя добросовестные учителя. По-видимому, вспоминая об этом прошлом, ты с презрением отнесешься ко всякому, кто посмел бы объявить неверным хотя бы самое незначительное положение этой науки. Но, быть может, это чувство гордой уверенности и покинет тебя, если тебя спросят: «Что понимаешь ты под утверждением, что эти положения истинны?» Коротко остановимся на этом вопросе.

Геометрия исходит, во-первых, из определенных основных понятий: плоскости, точки, прямой, с которыми мы связываем более или менее ясные представления, и, во-вторых, из определенных простейших положений (аксиом), которые мы склонны считать «истинными», основываясь на указанных представлениях. Все остальные положения сводятся к этим аксиомам, т. е. доказываются на основе логического метода, справедливость которого мы чувствуем себя вынужденными признать. Предложение считается правильным или «истинным», если оно выводится из аксиом привычным путем. Таким образом, вопрос об «истинности» отдельных геометрических положений сводится к вопросу об «истинности» аксиом. Однако давно известно, что последний вопрос не только не может быть решен с помощью методов геометрии, но вообще сам по себе не имеет смысла. Нельзя ставить вопрос об истинности того, что через две точки проходит только одна прямая. Можно лишь сказать, что эвклидова геометрия имеет дело с объектами, которые называются «прямыми» и которые она наделяет свойством однозначно определяться двумя своими точками. Понятие «истины» неприменимо к заключениям чистой геометрии, так как под словом «истина» в последнем счете мы всегда подразумеваем соответствие «реальному» предмету; однако геометрия занимается не отношением ее понятий к предметам опыта, а лишь логической связью этих понятий между собой.

Нетрудно объяснить, почему тем не менее мы считаем положения геометрии «истинными». Геометрическим понятием более или менее точно соответствуют предметы природы; при этом последние несомненно являются единственной причиной возникновения указанных понятий. Хотя геометрия и отвлекается от этого, чтобы придать своим построениям возможно большую логическую закон-

ченность, все же, например, привычка считать за отрезок кратчайшее расстояние между двумя заданными точками на практически твердом теле глубоко коренится в навыках нашего мышления. Далее, мы привыкли считать три точки находящимися на одной прямой, если при подходящем выборе пункта наблюдения одним глазом кажущиеся места этих точек могут быть приведены в совпадение.

Если теперь, следуя навыкам мышления, присоединим к теоремам эвклидовой геометрии одно-единственное утверждение, а именно, что двум точкам практически твердого тела всегда соответствует одно и то же расстояние (отрезок), какие бы изменения положения тела не происходили, то теоремы эвклидовой геометрии превращаются в теоремы о возможных относительных положениях практически твердых тел¹.

Дополненную таким образом геометрию следует рассматривать как область физики. Теперь уже с полным правом можно поставить вопрос об «истинности» геометрических теорем, интерпретируемых указанным образом; в самом деле, можно спросить, справедливы ли теоремы для тех реальных предметов, которые мы связали с геометрическими понятиями. Выражаясь несколько неточно, мы можем также сказать, что под «истинностью» некоторого положения геометрии в этом смысле мы понимаем его справедливость при построении с помощью циркуля и линейки.

Убеждение в «истинности» положений геометрии в этом смысле основывается, конечно, исключительно на весьма несовершенном опыте. Мы допустим сначала такую истинность положений геометрии, чтобы в последней части наших рассуждений (при рассмотрении общей теории относительности) установить, как и насколько эта истинность должна быть ограничена.

§ 2. Система координат

На основании указанной физической интерпретации расстояния мы получаем также возможность установить путем измерений расстояние между двумя точками твердого тела. Для этого нам необходима раз навсегда определенная длина (линейка S), которая будет применяться в качестве единичного масштаба. Пусть A и B — две точки твердого тела; тогда соединяющая их прямая может быть построена по законам геометрии. Далее, на этой прямой будем откладывать длины S , начиная от точки A , до тех пор, пока не достигнем B . Число укладываемых

¹ Этим понятие прямой связывается с реальным предметом природы. Три точки A , B и C неизменяемого тела лежат на одной прямой, если при заданных точках A и C точка B избрана так, что сумма расстояний AB и BC становится возможно меньшей. Этого дополнительного указания в данном случае достаточно.

на этом отрезке длин и будет числом, измеряющим длину отрезка AB . На этом основано всякое измерение длины¹.

Всякое пространственное описание места какого-либо события или предмета основано на том, что указывается точка некоторого твердого тела (тела отсчета), с которой совпадает данное событие, причем это относится не только к научному описанию, но и к повседневной жизни. Например, анализируя задание места: «в Берлине, на Потсдамской площади», мы находим, что это означает следующее. Твердым телом, к которому относится указанное место, является Земля, а «Потсдамская площадь в Берлине», — отмеченная на этом теле точка с данным названием, с которой пространственно совпадает рассматриваемое событие².

Подобный примитивный способ задания места пригоден лишь для мест на поверхности твердых тел и связан с наличием различных точек на этой поверхности. Проследим, как человеческое мышление освобождается от обоих этих ограничений, не меняя сущности способа задания места. Если, например, над Потсдамской площадью проплывает облако, то его положение по отношению к земной поверхности может быть определено следующим образом: на площади отвесно ставят шест, который достает до облака. Измеренная масштабом длина шеста вместе с указанием положения основания шеста полностью определяет в этом случае местонахождение облака. На этом примере мы видим, каким путем развивалось понятие места.

а) Неподвижное твердое тело, к которому относится указание места, будучи увеличено в размерах так, чтобы оно достигало предмета, местоположение которого надлежит определить.

б) Для характеристики положения, вместо отметки с названием, пользуются числом (в данном случае измеренной масштабом длиной шеста).

в) О высоте облака говорят и тогда, когда шеста, достигающего до облака, в действительности и нет. В нашем случае длину шеста можно найти, оптически определяя положение облака с различных точек земной поверхности, принимая во внимание законы распространения света.

Из изложенного выше ясно, что для описания места удобно отказать от использования отметок на неподвижных твердых телах с особыми названиями и пользоваться числами. В физических измерениях это достигается применением декартовой системы координат.

¹ При этом предполагается, что измерительная линейка укладывается целое число раз, т. е. в результате получается целое число. В общем случае это затруднение можно преодолеть, пользуясь разделенным масштабом, введение которого не вносит ничего нового.

² Здесь нет нужды в дальнейшем исследовании того, что означает «пространственное совпадение»; это понятие настолько ясно, что в каждом отдельном частном случае вряд ли могут возникнуть сомнения в его применимости.

Последняя состоит из трех взаимно перпендикулярных неподвижных плоскостей, связанных твердым телом. Место какого-либо события относительно системы координат определяется (в основных чертах) длиной трех перпендикуляров (или координат) x , y , z , которые могут быть опущены из этого места на указанные три плоскости. Длины этих трех перпендикуляров можно определить путем ряда манипуляций с твердыми масштабами, пользуясь теоремами и методами евклидовой геометрии.

На практике эти три плоскости, образующие систему координат, обычно не применяются, а сами координаты определяются без построений с твердыми масштабами. Однако, во избежание неясности в результатах и выводах физики и астрономии, всегда следует искать физический смысл определения места¹.

Таким образом, мы приходим к следующему выводу. Всякое пространственное описание событий предполагает наличие твердого тела, с которым события связаны пространственно. Эта связь предполагает, что «расстояния» подчиняются законам евклидовой геометрии, причем сами «расстояния» определяются физически двумя отметками на твердом теле.

§ 3. Пространство и время в классической механике

Если я без долгих размышлений и подробных разъяснений сформулирую задачу механики следующим образом: «механика описывает изменение положения тел в пространстве с течением времени», то этим я приму на свою совесть не один тяжкий грех; в этих грехах я и покаюсь прежде всего.

Неясно, что следует понимать здесь под словами «место» и «пространство». Я стою у окна равномерно движущегося железнодорожного вагона и выпускаю из рук на полотно дороги камень, сообщая ему скорости. Тогда я увижу (отвлекаясь от сопротивления воздуха), что камень падает прямолинейно вниз. Противный, находящийся вблизи полотна железной дороги и наблюдающий одновременно со мной за падением камня, видит, что камень падает по параболе. Тогда я задаю вопрос: где «в действительности» находятся «места», через которые проходит камень при падении, — на прямой линии или на параболе? Ответ очевиден из соображений, высказанных в § 2. Прежде всего оставим в стороне слово «пространство», под которым, признаемся, мы ничего определенного не подразумеваем; вместо этого мы рассмотрим «движение по отношению к практически твердому телу».

¹ Уточнение и видоизменение этих представлений потребуются нам лишь в связи с общей теорией относительности, которая рассматривается во второй части этой книги.

отсчета». В предыдущем параграфе мы дали определение понятия места относительно тела отсчета (железнодорожный вагон или поверхность Земли). Заменяя понятие «тело отсчета» понятием «система координат», полезным для математического описания, мы можем сказать: камень описывает прямую линию относительно системы координат, жестко связанной с вагоном, и параболу относительно системы координат, жестко связанной с поверхностью Земли. Из этого примера следует, что не существует траектории¹ самой по себе; всякая траектория относится к определенному телу отсчета.

Однако полное описание движения может быть дано лишь в том случае, если будет указано, как меняется положение тела со временем; иначе говоря, для каждой точки траектории должен быть указан момент времени, когда тело находится в этой точке. К этим указаниям должно быть добавлено такое определение времени, чтобы соответствующие промежутки времени можно было рассматривать как величины, принципиально доступные наблюдению (результаты измерений). В рассмотренном примере мы можем удовлетворить этому условию, оставаясь на почве классической механики, следующим образом. Представим себе двое совершенно одинаковых часов; одни часы находятся у человека в железнодорожном вагоне, другие — у прохожего, находящегося у полотна железной дороги. Каждый наблюдатель точно устанавливает, в каком месте по отношению к соответствующему телу отсчета находится камень в момент тикания часов, которые каждый из них держит в руке. При этом мы не принимаем во внимание неточность, возникающую вследствие конечной величины скорости распространения света. Об этой и о другой возникающей здесь трудности мы будем говорить позднее.

§ 4. Галилеева система координат

Основной закон механики Галилея — Ньютона, известный под названием закона инерции, гласит: «Тело, достаточно удаленное от других тел, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения». В этом законе говорится не только о движении тела, но также и о телах отсчета или системах координат, которыми пользуются при механическом описании. Телами отсчета, к которым в хорошем приближении применим закон инерции, являются, очевидно, неподвижные звезды. Но если мы пользуемся системой координат, которая жестко связана с Землей, то относительно такой системы каждая неподвижная звезда описывает в течение одних (астрономических) суток круг огромного радиуса в противоречии с буквальным смыслом закона

¹ Т. е. кривой, по которой движется тело.

инерции. Если, таким образом, строго придерживаться этого закона, то движение следует относить лишь к таким системам координат, по отношению к которым неподвижные звезды не совершают никаких круговых движений. Систему координат, состояние движения которой таково, что относительно нее выполняется закон инерции, мы называем «галилеевой системой координат». Законы механики Галилея — Ньютона применимы только для галилеевой системы координат.

§ 5. Принцип относительности (в узком смысле)

Для возможно большей наглядности мы снова будем исходить из нашего примера равномерно движущегося железнодорожного вагона. Назовем его движение равномерной трансляцией («равномерной» — так как оно имеет постоянные скорость и направление, и «трансляцией» — так как вагон, меняя свое положение относительно железнодорожного полотна, не испытывает никаких вращений). Пусть в воздухе летит ворона, прямолинейно и равномерно, если наблюдать с полотна железной дороги. Тогда с точки зрения наблюдателя, находящегося в движущемся вагоне, скорость этой вороны будет иметь другую величину и направление, но движение также будет прямолинейным и равномерным. Или в абстрактной форме: если масса m движется прямолинейно и равномерно относительно системы координат K , то она движется прямолинейно и равномерно также и по отношению к другой системе координат в случае, если последняя движется равномерно и прямолинейно относительно K . Отсюда, с учетом рассуждений предшествующих параграфов, вытекает следующее. Если K — галилеева система координат, то и всякая другая система координат K' , движущаяся относительно K равномерно и прямолинейно, также является галилеевой системой. В системе K' , так же как и в системе K , выполняются законы механики Галилея — Ньютона.

Сделаем еще один шаг в сторону обобщения, высказав следующее утверждение. Если K' — система координат, движущаяся равномерно и без вращения относительно системы K , то явления природы протекают относительно системы K' по тем же общим законам, что и относительно системы K . Это положение мы называем «принципом относительности» (в узком смысле).

Пока существовало убеждение, что все явления природы могут быть описаны с помощью классической механики, можно было не сомневаться в справедливости этого принципа относительности. Однако с новейшим развитием электродинамики и оптики стало все более очевидным, что одной классической механики недостаточно для полного описания физических явлений. Тем самым вопрос о справедливости принципа относительности стал

весьма спорным, причем не исключалась возможность отрицательного ответа на этот вопрос.

Тем не менее имеются два общих факта, которые говорят в пользу справедливости принципа относительности. Если классическая механика и не дает достаточно широкой базы для описания *всех* физических явлений, то в ней все же содержится весьма значительная доля истины; достаточно вспомнить, что она с поразительной отчетливостью описывает реальные движения небесных тел. Поэтому принцип относительности в области *механики* должен выполняться также с большой точностью. Однако априори маловероятно, чтобы столь общий принцип, выполняющийся с такой точностью в *одной* области явлений, был неприменим в другой области явлений.

Второй аргумент, к которому мы позднее вернемся, состоит в следующем. Если принцип относительности (в узком смысле) не выполняется, то равномерно движущиеся относительно друг друга галилеевы системы координат K, K', K'' и т. д. *неравноценны* для описания явлений природы. Тогда единственным мыслимым предположением было бы то, что законы природы могут быть особенно просто и естественно сформулированы только тогда, когда из всех галилеевых систем координат выбрана в качестве исходной одна система K_0 , имеющая определенное состояние движения. Тогда мы вправе были бы (ввиду преимуществ в описании природы) считать эту систему «абсолютно покоящейся», а другие галилеевы системы — «движущимися». Если бы, например, железнодорожное полотно было системой K_0 , то наш вагон был бы системой K , относительно которой были бы справедливы более сложные законы, чем относительно системы K_0 . Эта большая сложность объяснялась бы тем, что вагон K («действительно») движется относительно K_0 . В этих общих законах природы, сформулированных относительно системы K , должны были бы играть роль величина и направление скорости движения вагона. Можно было бы, например, ожидать, что высота звука органной трубы была бы иной, если бы ось последней была параллельна направлению движения, чем в случае, если бы она была перпендикулярна этому направлению. Но наша Земля, ввиду ее движения по орбите вокруг Солнца, может сравниваться с вагоном, движущимся со скоростью около 30 км/сек. Поэтому, в случае неприменимости принципа относительности, следовало бы ожидать, что в законы природы должно войти направление движения Земли в каждый данный момент, т. е. поведение физических систем должно зависеть от их пространственной ориентации относительно Земли. В самом деле, вследствие изменения в течение года направления скорости орбитального движения Земли, последняя не может в течение всего года оставаться в покое относительно гипотетической системы. Но при всей тщательности наблюдений до сих пор не удалось обнаружить подобную анизотропию земного

физического пространства, т. е. физическую неравноценность различных направлений. Этот аргумент в пользу принципа относительности является особенно веским.

§ 6. Теорема сложения скоростей в классической механике

Пусть железнодорожный вагон, с которым мы уже не раз имели дело, движется по рельсам с постоянной скоростью v . Человек, находящийся в вагоне, идет вдоль вагона со скоростью w в направлении движения вагона. С какой скоростью W передвигается этот человек относительно полотна железной дороги? Единственный возможный ответ может быть дан, по-видимому, из следующего рассуждения. Если бы человек остановился на одну секунду, то он переместился бы вперед относительно полотна дороги на отрезок v , равный скорости движения вагона. Но в действительности человек в течение этой секунды, кроме того, перемещается и относительно вагона, а следовательно, и относительно полотна дороги, на отрезок w , равный скорости его движения по вагону. Таким образом, в течение рассматриваемой секунды он перемещается относительно полотна дороги всего на расстояние

$$W = v + w.$$

В дальнейшем мы увидим, что все это рассуждение, выражающее теорему сложения скоростей в классической механике, неверно и, следовательно, только что записанный закон не соответствует действительности. Однако временно мы будем считать его верным.

§ 7. Кажущаяся несовместимость закона распространения света с принципом относительности

Вряд ли имеется в физике более простой закон, чем тот, согласно которому распространяется свет в пустом пространстве. Всякий школьник знает, или, по крайней мере, думает, будто он знает, что свет распространяется прямолинейно со скоростью 300 000 км/сек. Мы знаем, во всяком случае, с большой точностью, что эта скорость одинакова для всех цветов спектра, ибо если бы это было не так, то при закрытии звезды ее темным спутником мы наблюдали бы минимум излучения для разных цветов неодновременно. Подобные же рассуждения, основанные на наблюдении двойных звезд, позволили голландскому астроному де Ситтеру показать, что скорость распространения света не может зависеть от скорости движения тела, испускающего свет.

Предположение о зависимости скорости света от направления «в пространстве» является само по себе крайне маловероятным.

Короче говоря, предположим, что школьник, доверяющий простому закону постоянной скорости света c (в пустоте), прав. Кто бы мог подумать, что этот простой закон приводит добросовестно мыслящего физика к огромным логическим затруднениям? Эти затруднения заключаются в следующем.

Мы должны относить процесс распространения света, как и всякий другой процесс, к некоторому твердому телу отсчета (система координат). Снова выберем в качестве такового железнодорожное полотно. Представим, что воздух над этим последним удален. Пусть вдоль полотна дороги распространяется луч света, который, согласно сказанному выше, движется относительно полотна со скоростью c . Пусть по рельсам снова движется со скоростью v наш вагон, притом в том же направлении, в котором распространяется световой луч, но, конечно, гораздо медленнее. Возникает вопрос, какова скорость распространения света относительно вагона? Нетрудно видеть, что здесь можно применить соображения предыдущего параграфа. Теперь роль человека, движущегося относительно вагона, выполняет световой луч. Вместо скорости W человека относительно полотна дороги здесь выступает скорость света по отношению к последнему. Пусть w — искомая скорость света относительно вагона, для которой, следовательно, имеем

$$w = c - v.$$

Таким образом, скорость распространения светового луча относительно вагона оказывается меньше c .

Но этот результат противоречит изложенному в § 5 принципу относительности. В самом деле, согласно принципу относительности, закон распространения света в пустоте, как и всякий другой закон природы, должен бы быть одинаковым как для полотна железной дороги, принимаемого в качестве тела отсчета, так и для вагона. Но, согласно нашим рассуждениям, это кажется невозможным. Если всякий световой луч распространяется относительно полотна дороги со скоростью c , то, казалось бы, поэтому скорость распространения света относительно вагона должна быть иной — в противоречии с принципом относительности.

В связи с этой дилеммой неизбежным представляется отказ либо от принципа относительности, либо от простого закона распространения света в пустоте. Читатель, внимательно следивший за изложенными выше рассуждениями, несомненно считает, что принцип относительности, являющийся почти неоспоримым в силу своей естественности и простоты, должен быть сохранен, тогда как закон распространения света в пустоте следует заменить более сложным законом, совместимым с принципом относительности. Однако развитие теоретической физики показало, что этот путь неприемлем. Глубокие теоретические исследования электродина-

мических и оптических процессов в движущихся телах, выполненные Г. А. Лоренцом, показали, что опыты в этих областях приводят к необходимости такой теории электромагнитных явлений, неизбежным следствием которой является закон постоянства скорости света в пустоте. Поэтому ведущие теоретики были скорее склонны отказаться от принципа относительности, хотя и не удавалось найти ни одного экспериментального факта, противоречащего этому принципу.

Здесь и выступила на сцену теория относительности. В результате анализа физических понятий времени и пространства было показано, что *в действительности принцип относительности и закон распространения света совместимы* и что, систематически придерживаясь обоих этих законов, можно построить логически безупречную теорию. Основные положения этой теории, которую, в отличие от ее обобщения, мы называем «специальной теорией относительности», будут изложены ниже.

§ 8. О понятии времени в физике

В двух весьма удаленных друг от друга местах A и B нашего железнодорожного полотна в рельсы ударила молния. Кроме того, я утверждаю, что оба эти удара произошли *одновременно*. Если теперь я спрошу тебя, читатель, имеет ли какой-либо смысл это последнее утверждение, то ты уверенно ответишь мне: «Да». Однако, если я попрошу тебя более точно объяснить мне смысл этого моего утверждения, то после некоторого размышления ты заметишь, что ответ на этот вопрос не так прост, как это кажется на первый взгляд.

Через некоторое время тебе, быть может, придет в голову следующий ответ: «Смысл этого утверждения ясен сам по себе и не нуждается в дальнейших объяснениях; однако я должен несколько подумать, получив предложение определить путем наблюдений, происходят ли в данном конкретном случае оба явления одновременно». Но я не могу удовлетвориться этим ответом по следующим основаниям. Предположим, что некоторый искусный метеоролог установил путем остроумных исследований, что в местах A и B удар молнии должен происходить всегда одновременно; тогда возникает задача проверить, соответствует ли действительности этот теоретический результат. Аналогично обстоит дело со всеми физическими утверждениями, в которых играет роль понятие «одновременности». Это понятие существует для физика лишь в том случае, если имеется возможность найти в конкретном случае, соответствует ли действительности это понятие. Следовательно, необходимо такое определение одновременности, которое дало бы метод, позволяющий в каждом данном случае решить на основании экспериментов, вспыхивают ли обе молнии

одновременно. Пока это требование не выполнено, я как физик (так же как и нефизик) впадаю в самообман, связывая какой-то смысл с утверждением одновременности. (Не читай дальше, любезный читатель, прежде чем ты не согласишься с этим вполне).

После некоторых размышлений ты предлагаешь следующий способ констатировать одновременности. Отрезок AB измеряется вдоль рельсового пути, и в середине M отрезка находится наблюдатель, снабженный устройством (например, двумя зеркалами, расположенными под углом 90° друг к другу), которое позволяет ему наблюдать одновременно оба места A и B . Если наблюдатель воспринимает обе молнии одновременно, то они произошли одновременно.

Я очень доволен этим предложением, однако считаю вопрос не вполне выясненным и вынужден выдвинуть следующее возражение: «Твое определение было бы безусловно правильным, если бы я уже знал, что свет от удара молнии, воспринимаемый наблюдателем в точке M , распространяется с одинаковой скоростью на отрезках AM и BM . Однако доказательство этой предпосылки было бы возможно лишь в том случае, если бы мы имели способ измерения времени. Таким образом, здесь получается замкнутый логический круг».

После некоторого дальнейшего размышления ты не без основания бросишь на меня несколько презрительный взгляд и скажешь: «Я все же считаю свое первоначальное определение справедливым, так как в нем не содержится никаких предположений о свете. К определению одновременности можно предъявлять лишь одно требование, а именно, чтобы в каждом реальном случае можно было опытным путем решить вопрос о справедливости введенного понятия. Мое определение бесспорно удовлетворяет этому требованию. Утверждение, что свет проходит расстояния AM и BM в одно и то же время, в действительности не является предпосылкой или гипотезой о физической природе света, а утверждением, которое можно сделать на основании свободного выбора, чтобы прийти к определению одновременности».

Ясно, что этим определением можно воспользоваться для того, чтобы придать точный смысл понятию одновременности не только двух, но и сколь угодно большого числа событий, независимо от того, как расположены места этих событий относительно тела отсчета (в нашем примере — относительно железнодорожного полотна)¹. Это приводит нас к определению «времени» в физике.

¹ Мы принимаем в дальнейшем, что если три события A , B , C происходят в различных местах таким образом, что A одновременно с B и B одновременно с C (одновременно в смысле данного выше определения), то критерий одновременности соблюден также и для пары событий A — C . Это допущение представляет собой физическую гипотезу о законе распространения света; она должна, безусловно, выполняться, если только закон постоянства скорости света в пустоте твердо установлен.

Именно: представим себе, что в точках A , B , C рельсового пути (системы координат) помещены одинаковые часы, стрелки которых одновременно (в вышеупомянутом смысле) показывают одинаковое время. Тогда под «временем» некоторого события подразумевается показание (положение стрелок) тех из часов, которые находятся в непосредственной близости к месту события. Следовательно, каждое событие связывается с таким значением времени, которое принципиально наблюдаемо.

Это утверждение содержит еще одну физическую гипотезу, в справедливости которой вряд ли можно сомневаться, если только эмпирические данные не будут ей противоречить. Именно: предполагается, что ход всех этих часов «одинаков», если они имеют одинаковую конструкцию. Точнее говоря, если двое покоящихся часов, помещенных в различных местах тела отсчета, поставлены так, что некоторое показание стрелок одних из этих часов одновременно (в вышеупомянутом смысле) с таким же показанием других часов, то одинаковые показания стрелок обоих часов одновременны всегда (в смысле приведенного выше определения).

§ 9. Относительность одновременности

До сих пор мы относили наши рассуждения к определенному телу отсчета, роль которого выполняло «железнодорожное полотно». Пусть очень длинный поезд идет с постоянной скоростью v по рельсовому пути в направлении, указанном на рис. 1. Людям, находящимся в этом поезде, более удобно принять поезд за твердое тело отсчета (систему координат); все события они относят к поезду. Всякое событие, происходящее на протяжении железнодорожного пути, происходит также и в определенной точке поезда. Определение одновременности для поезда может быть дано точно таким же способом, что и для рельсового пути. Однако естественно возникает следующий вопрос.

Являются ли два события (например, удары молнии в A и B), происходящие одновременно относительно полотна дороги, также одновременными и относительно поезда? Сейчас мы покажем, что ответ может быть только отрицательным.

Когда мы говорим об ударах молнии A и B , одновременных относительно полотна дороги, то это означает, что световые лучи, исходящие из A и B , встречаются в средней точке M участка полотна AB . Но событиям A и B соответствуют также места A и B на поезде. Пусть M' — средняя точка отрезка AB движущегося поезда. Хотя эта точка в момент ударов молнии¹ и совпадает с

¹ Если наблюдать с полотна дороги.

точкой M , она движется со скоростью v поезда вправо (см. рис. 1). Если бы находящийся в поезде в точке M' наблюдатель не обладал этой скоростью, то он продолжал бы оставаться в точке M и тогда световые лучи от ударов молнии в A и B достигли бы его одновременно, т. е. оба эти луча встретились бы в том месте, где он находится. Однако в действительности он движется (если наблюдать с полотна дороги) навстречу световому лучу,

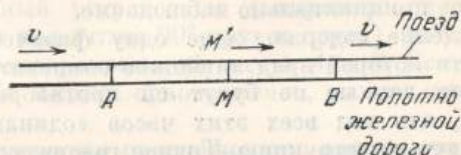


Рис. 1.

идущему из точки B , и в то же время движется по световому лучу, идущему из точки A . Следовательно, наблюдатель увидит световой луч из B ранее, чем луч из A . Наблюдатели, пользующиеся поездом в качестве тела отсчета, должны, таким образом, прийти к выводу, что удар молнии в B произошел ранее, чем удар молнии в A . Следовательно, мы приходим к важному результату.

События, одновременные относительно полотна железной дороги, не являются одновременными по отношению к поезду и наоборот (относительность одновременности). Всякое тело отсчета (система координат) имеет свое особое время; указание времени имеет смысл лишь тогда, когда указывается тело отсчета, к которому оно относится.

До появления теории относительности физика молчаливо принимала, что указания времени абсолютны, т. е. не зависят от состояния движения тела отсчета. Но мы только что видели, что это предположение несовместимо с наиболее естественным определением одновременности; если же отказаться от этого предположения, то исчезает и описанный в § 7 конфликт между законом распространения света в пустоте и принципом относительности.

Именно к этому конфликту приводит рассуждение в § 6, которое теперь уже неприемлемо. Там мы полагали, что человек в вагоне, проходящий относительно вагона за одну секунду отрезок w , проходит этот же отрезок по отношению к полотну дороги также за одну секунду. Но, согласно только что изложенным соображениям, время, необходимое для определенного процесса относительно вагона, не может быть равно длительности этого же процесса относительно полотна железной дороги как тела отсчета; следовательно, нельзя утверждать, что человек, который проходит некоторый отрезок w , проходит его относительно полотна

дороги в промежуток времени, равный — при наблюдении с полотна дороги — одной секунде.

Рассуждение в § 6 основывается еще на другой предпосылке, которая после внимательного рассмотрения оказывается произвольной, хотя до появления теории относительности она всегда (молчаливо) предполагалась.

§ 10. Об относительности понятия пространственного расстояния

Рассмотрим два определенных места поезда¹, движущегося по железной дороге со скоростью v , и выясним, каково расстояние между этими местами. Мы уже знаем, что для измерения расстояния необходимо тело отсчета, относительно которого измеряется расстояние. Проще всего принять за тело отсчета (систему координат) сам поезд. Находящийся в поезде наблюдатель измеряет расстояние, откладывая свой масштаб по прямой линии, например вдоль пола вагона, пока не продвинется от одной отмеченной точки до другой. Число, показывающее, сколько раз должен быть отложен масштаб, и есть искомое расстояние.

Иначе обстоит дело, если расстояние должно измеряться по полотну железной дороги. Тогда можно воспользоваться следующим методом. Пусть A' и B' — две точки поезда, расстояние между которыми требуется определить; пусть обе эти точки движутся вдоль железнодорожного полотна со скоростью v . Сначала мы найдем точки A и B полотна железной дороги, с которыми совпадают точки поезда A' и B' в определенный момент времени t при наблюдении с полотна дороги. Эти точки A и B полотна дороги можно найти с помощью определения времени, данного в § 8. Затем измеряется расстояние между этими точками A и B путем откладывания единичного масштаба вдоль полотна дороги.

Априори не исключено, что результат этого последнего измерения не совпадает с результатом первого. Следовательно, при измерении с полотна железной дороги длина поезда может оказаться иной, чем при измерении в самом поезде. Это обстоятельство является вторым возражением против, на первый взгляд очевидного, вывода § 6. Именно, если человек в вагоне проходит в единицу времени, измеряемого в поезде, отрезок w , то при измерении с полотна дороги этот отрезок не обязательно должен равняться w .

§ 11. Преобразование Лоренца

Выводы последних трех параграфов показывают, что кажущаяся несовместимость закона распространения света с принципом относительности, отмеченная в § 7, выведена на основе

¹ Например, середины первого и второго вагонов.

двух, ничем не оправдываемых гипотез классической механики; эти гипотезы гласят:

1. Промежуток времени между двумя событиями не зависит от состояния движения тела отсчета.

2. Расстояние между двумя точками твердого тела не зависит от состояния движения тела отсчета.

Если отказаться от этих гипотез, то исчезает дилемма § 7, поскольку выведенная в § 6 теорема сложения скоростей будет уже неприменима. Появляется возможность согласовать закон распространения света в пустоте с принципом относительности. Мы приходим к вопросу: какие изменения надо внести в рассуждения § 6, чтобы устранить кажущееся противоречие между обоими этими фундаментальными эмпирическими фактами. Этот вопрос приводит к более общему вопросу. В § 6 мы встречаемся с понятиями места и времени относительно поезда и относительно полотна дороги. Как найти место и время какого-либо события относительно поезда, если известны место и время события относительно полотна железной дороги? Мыслим ли такой ответ на этот вопрос, чтобы закон распространения света в пустоте не противоречил принципу относительности? Иными словами, мыслимо ли такое соотношение между временем и местом отдельных событий относительно двух тел отсчета, чтобы любой световой луч обладал одной и той же скоростью c относительно полотна дороги и относительно поезда? Этот вопрос приводит к вполне определенному утвердительному ответу, к вполне определенному закону преобразования пространственно-временных величин некоторого события при переходе от одного тела отсчета к другому.

Прежде чем перейти к этому, сделаем несколько предварительных замечаний. До сих пор мы рассматривали лишь события, происходившие вдоль полотна железной дороги, которое формально играло роль прямой линии. Однако указанным в § 2 способом это тело отсчета можно представить себе продолженным при помощи системы стержней в стороны и вверх таким образом, что любое событие может быть локализовано по отношению к этой системе. Аналогично можно представить себе поезд, идущий со скоростью v и заполняющий все пространство так, что любое, сколь угодно удаленное событие могло бы быть локализовано и относительно этого второго тела отсчета. Не делая принципиальной ошибки, можно отвлекаться от того обстоятельства, что в действительности такая система не может существовать вследствие непроницаемости твердых тел. В каждой подобной системе представим себе три взаимно перпендикулярные плоские стенки, которые назовем «координатными плоскостями» («система координат»). Тогда полотну железной дороги соответствует система координат K , а поезду — система координат K' . Всякое событие фиксируется в пространстве тремя перпендикулярами x , y , z , опускаемыми на координатные плоскости, и во времени — ука-

занием некоторого момента времени t . То же событие относительно координатной системы K' фиксируется в пространстве и времени соответствующими значениями x' , y' , z' , t' , очевидно, не совпадающими с x , y , z , t . Выше мы подробно изложили, как надо интерпретировать эти величины в терминах физических измерений.

Наша задача в точной формулировке сводится к следующему. Каковы значения x' , y' , z' , t' некоторого события относительно системы K' , если заданы значения x , y , z , t того же события относительно системы K ? Соотношения должны быть выбраны так, чтобы для одного и того же светового луча (причем для любого) относительно K и K' выполнялся закон распространения света в пустоте. Эта задача для приведенного на рис. 2 пространственного расположения систем координат решается следующими уравнениями:

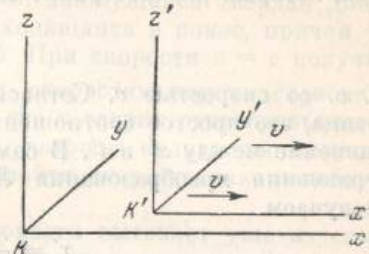


Рис. 2.

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}.\end{aligned}$$

Эта система уравнений носит название «преобразования Лоренца»¹.

Но если бы вместо закона распространения света мы молчаливо исходили из представлений старой механики об абсолютном характере времени и протяженности, то вместо этих уравнений преобразования мы получили бы уравнения

$$\begin{aligned}x' &= x - vt, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= t.\end{aligned}$$

Последнюю систему уравнений часто называют «преобразованием Галилея». Преобразование Галилея выводится из преобразования Лоренца, если в последнем скорость света c положить равной бесконечно большому значению.

¹ Простой вывод преобразования Лоренца дан в Приложении I.

Справедливость закона распространения света в пустоте как для тела отсчета K , так и для тела отсчета K' при преобразовании Лоренца легко видеть из следующего примера. Пусть в положительном направлении оси x посылается некоторый световой сигнал, который распространяется согласно уравнению

$$x = ct,$$

т. е. со скоростью c . Согласно уравнениям преобразования Лоренца, это простое соотношение между x и t обуславливает соотношение между x' и t' . В самом деле, если в первое и четвертое уравнения преобразования Лоренца подставить ct вместо x , то получаем

$$x' = \frac{(c-v)t}{\sqrt{1-v^2/c^2}},$$

$$t' = \frac{(1-v/c)t}{\sqrt{1-v^2/c^2}},$$

откуда путем деления получаем

$$x' = ct'.$$

Это уравнение описывает распространение света, когда оно отнесено к системе K' . Таким образом, скорость света равна c также и относительно тела отсчета K . Аналогичный результат может быть получен и для световых лучей, распространяющихся в любом другом направлении. Это и не удивительно, так как уравнения преобразования Лоренца выведены именно в предположении этого результата.

§ 12. Свойства движущихся масштабов и часов

Я кладу метровую линейку вдоль оси x' системы K' так, чтобы ее начало находилось в точке $x' = 0$, а конец — в точке $x' = 1$. Какова длина этой линейки относительно системы K ? Чтобы узнать это, достаточно спросить лишь, где находятся ее начало и конец относительно K в определенный момент t в системе K . Для начала и конца линейки из первого уравнения преобразования Лоренца при $t = 0$ находим

$$x \text{ (начало линейки)} = 0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

$$x \text{ (конец линейки)} = 1 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Таким образом, расстояние между обеими этими точками равно $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Но относительно K метровая линейка движется со скоростью v . Отсюда следует, что длина твердой метровой линейки, движущейся в направлении своей длины со скоростью v , составляет $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Таким образом, движущаяся твердая линейка короче, чем та же линейка, находящаяся в покое, причем тем короче, чем быстрее она движется. При скорости $v = c$ получаем $\sqrt{1 - v^2/c^2} = 0$; при еще больших скоростях корень становится мнимым. Из этого мы заключаем, что в теории относительности c играет роль предельной скорости, которой нельзя достигнуть и которую тем более не может превзойти скорость какого-либо реального тела.

Эта роль c как предельной скорости вытекает уже из самих уравнений преобразования Лоренца, поскольку эти уравнения теряют смысл, когда v превышает c .

Наоборот, если бы мы рассматривали метровую линейку, расположенную вдоль оси x и покоящуюся относительно K , то нашли бы, что ее длина относительно K' равна $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$; это заключено уже в самом смысле принципа относительности, положенного в основу наших рассуждений.

Априори ясно, что из уравнений преобразования можно получить некоторые данные о физических свойствах масштабов и часов. В самом деле величины x, y, z, t представляют собой не что иное, как результаты измерений с помощью масштабов и часов. Если бы мы положили в основу преобразования Галилея, то мы не имели бы сокращения масштабов вследствие движения.

Рассмотрим теперь секундомер, покоящийся длительное время в начале координат ($x' = 0$) системы K' . Тогда $t = 0$ и $t = 1$ соответствуют двум последовательным ударам этих часов. Для этих моментов времени первое и четвертое уравнения преобразования Лоренца дают:

$$t = 0$$

и

$$t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Относительно системы K часы движутся со скоростью v ; при наблюдении из этой системы отсчета между двумя ударами этих часов проходит не секунда, а $t = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ секунд, т. е. несколько большее время. Часы, вследствие своего движения, идут медленнее, чем в состоянии покоя. Здесь скорость c также играет роль недостижимой предельной скорости.

§ 13. Теорема сложения скоростей. Опыт Физо

Так как на практике мы можем сообщать масштабам и часам лишь скорости, незначительные по сравнению со скоростью света c , то выводы предыдущего параграфа вряд ли можно непосредственно сравнить с опытом. Но так как эти выводы покажутся читателю весьма странными, то можно привести еще одно следствие теории, которое легко выводится из вышеизложенного и блестяще подтверждается опытом.

В § 6 мы вывели теорему сложения скоростей, имеющих одинаковое направление, в таком виде, как она следует из гипотез классической механики. Это же можно легко получить и из преобразования Галилея (§ 11). Вместо идущего по вагону человека мы рассматриваем точку, движущуюся относительно системы координат K' в соответствии с уравнением

$$x' = wt'.$$

Из первого и четвертого уравнений преобразования Галилея x' и t' можно выразить через x и t ; тогда получим

$$x = (v + w)t.$$

Это уравнение выражает не что иное, как закон движения точки относительно системы K (движение человека относительно полотна железной дороги); обозначая скорость этого движения через W , как и в § 6, получаем

$$W = v + w. \quad (A)$$

Но подобное рассуждение можно с таким же успехом провести на основе теории относительности. В уравнении

$$x' = wt'$$

выразим x' и t' через x и t , применяя первое и четвертое уравнения преобразования Лоренца. Тогда вместо уравнения (A) получим уравнение

$$W = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}}, \quad (B)$$

которое соответствует теореме сложения одинаково направленных скоростей в теории относительности. Теперь возникает вопрос, какая из этих двух теорем подтверждается на опыте. Ответ на этот вопрос дает исключительно важный эксперимент, поставленный более полувека назад гениальным физиком Физо и повторенный после того некоторыми лучшими физиками-экспериментаторами, так что его результат является бесспорным. Этот экс-

перимент решает следующий вопрос. В покоящейся жидкости распространяется свет с определенной скоростью w . С какой скоростью распространяется он в трубе R (см. рис. 3) по направлению, указанному стрелкой, если упомянутая жидкость течет по этой трубе со скоростью v ?

Во всяком случае мы можем предположить в смысле принципа относительности, что *относительно жидкости* свет распространяется всегда с одной и той же скоростью w , независимо от того, движется ли жидкость относительно других тел или она непод-

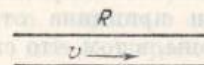


Рис. 3.

вижна. Следовательно, известны скорость света относительно жидкости и скорость последней относительно трубы; требуется найти скорость света относительно трубы.

Ясно, что мы снова имеем задачу § 6. Труба играет роль полотна железной дороги, т. е. системы координат K , а жидкость — роль вагона, т. е. системы координат K' , и, наконец, свет — роль бегущего в вагоне человека или роль движущейся точки в настоящем параграфе. Таким образом, обозначая через W скорость света относительно трубы, можно ожидать, что она выразится либо уравнением (A), либо уравнением (B), в зависимости от того, соответствует ли действительности преобразование Галилея или преобразование Лоренца.

Эксперимент¹ решает вопрос в пользу уравнения (B), полученного из теории относительности, и притом с большой точностью. Влияние скорости течения жидкости v на распространение света, согласно последним превосходным измерениям Зеемана, выражается формулой (B) с ошибкой, меньшей 1%.

Правда, следует отметить, что задолго до появления теории относительности Г. А. Лоренц дал теорию этого явления и обосновал чисто электродинамическим путем при помощи определенных гипотез об электромагнитной структуре материи. Однако это обстоятельство несколько не уменьшает доказательную силу эксперимента Физо, как *experimentum crucis* в пользу теории относительности, поскольку электродинамика Максвелла — Лоренца, на которой базировалась первоначальная теория, несколько не противоречит теории относительности. Можно сказать, что теория

¹ Физо нашел, что $W = w + v(1 - 1/n^2)$, где $n = c/w$ — показатель преломления жидкости. С другой стороны, вследствие того, что величина vw/c^2 мала по сравнению с 1, из уравнения (B) получаем: $W = (w + v)(1 - vw/c^2)$ или, с одинаковой степенью точности, $w + v(1 - 1/n^2)$, что совпадает с результатом эксперимента Физо.

относительности выросла из электродинамики как поразительно простое обобщение и объединение ряда независимых друг от друга гипотез, на которых была основана электродинамика.

§ 14. Эвристическое значение теории относительности

Изложенный здесь ход мыслей можно кратко резюмировать следующим образом. Опыт привел к убеждению, с одной стороны, в справедливости принципа относительности (в узком смысле) и, с другой стороны, в том, что скорость распространения света в вакууме равна постоянному значению c . В результате объединения обоих постулатов получился закон преобразования прямоугольных координат x, y, z и времени t событий, составляющих явление природы; при этом получилось не преобразование Галилея, но (в противоречие с классической механикой) преобразование Лоренца.

Важную роль в этих рассуждениях играл закон распространения света, который подтверждается нашими фактическими знаниями. Однако, имея в своем распоряжении преобразование Лоренца, мы можем соединить этот закон с принципом относительности и выразить теорию следующим образом.

Всякий общий закон природы должен быть таким, чтобы он сохранял свой вид при замене пространственно-временных переменных x, y, z, t первоначальной системы координат K новыми пространственно-временными переменными x', y', z', t' другой системы координат K' ; при этом математическая связь между штрихованными и нештрихованными величинами определяется преобразованием Лоренца. Сформулируем это кратко: общие законы природы ковариантны относительно преобразований Лоренца.

Таково определенное математическое условие, которое накладывает на законы природы теория относительности; вследствие этого теория относительности становится ценным эвристическим вспомогательным средством для отыскания общих законов природы. Если бы был найден некоторый общий закон природы, не удовлетворяющий указанному условию, то тем самым было бы опровергнуто по меньшей мере одно из двух основных положений теории. Посмотрим теперь, к каким общим результатам привела к настоящему времени эта теория.

§ 15. Общие результаты теории

Из изложенного выше видно, что (специальная) теория относительности выросла из электродинамики и оптики. Она мало изменила положения этих теорий, но значительно упростила теоретические построения, т. е. вывод законов, и — что несравнен-

но важнее — заметно уменьшила число не зависящих друг от друга гипотез, лежащих в основе теории. Теория относительности придала теории Максвелла—Лоренца такую степень очевидности, что физики были бы полностью убеждены в ее справедливости даже в том случае, если бы эксперимент говорил бы в ее пользу не столь убедительно.

Классическая механика нуждается в некоторой модификации, чтобы быть в согласии с требованиями специальной теории относительности. Однако эта модификация касается, по существу, лишь законов быстрых движений, когда скорость движения материи не очень мала по сравнению со скоростью света. Такие быстрые движения мы встречаем лишь для электронов и ионов; в других движениях отклонения от законов классической механики слишком малы, чтобы их можно было заметить практически. О движениях звезд мы будем говорить лишь в связи с общей теорией относительности. Согласно теории относительности, кинетическая энергия материальной точки с массой m дается уже не общеизвестным выражением

$$m \frac{v^2}{2},$$

а выражением

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Это выражение становится бесконечным, когда скорость v приближается к скорости света c . Следовательно, скорость всегда должна оставаться меньшей c , как бы ни была велика энергия, затраченная на ускорение. Разлагая приведенное выше выражение для кинетической энергии в ряд, получаем

$$mc^2 + m \frac{v^2}{2} + \frac{3}{8} m \frac{v^4}{c^2} + \dots$$

Третий член этого разложения всегда мал по сравнению со вторым (который только и принимается во внимание в классической механике), если величина v^2/c^2 значительно меньше единицы. Первый член mc^2 не содержит скорости v и, следовательно, неинтересен в тех случаях, когда в задаче существенна лишь зависимость энергии материальной точки от скорости. О принципиальном значении этого слагаемого будет сказано ниже.

Важнейший результат общего характера, к которому привела специальная теория относительности, относится к понятию массы. Дорелятивистская физика знала два фундаментальных закона сохранения, а именно: закон сохранения энергии и закон сохранения массы; оба этих фундаментальных закона считались совершенно независимыми друг от друга. Теория относительности слила их в один. Расскажем кратко, как это произошло и как следует понимать это слияние.

Принцип относительности требует, чтобы закон сохранения энергии был справедлив не только относительно одной системы координат K , но и относительно всякой другой системы координат K' , движущейся относительно K (короче говоря, относительно всякой «галилеевой» системы координат) равномерно и прямолинейно. Переход от одной такой системы к другой, в отличие от классической механики, определяется преобразованием Лоренца.

Из этих предпосылок вместе с основными уравнениями электродинамики Максвелла можно путем сравнительно простых рассуждений о необходимости прийти к следующему выводу. Некоторое тело, движущееся со скоростью v и получающее энергию E_0 в форме излучения¹ без изменения своей скорости, увеличивает при этом свою энергию на величину

$$\frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Тогда искомая энергия тела с учетом приведенного выше выражения для кинетической энергии будет

$$\frac{\left(m + \frac{E_0}{c^2}\right) c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

Следовательно, тело обладает такой же энергией, как и тело, движущееся со скоростью v и имеющее массу $m + \frac{E_0}{c^2}$. Таким образом, можно сказать: если тело получает энергию E_0 , то его инертная масса возрастает на E_0/c^2 ; инертная масса тела не является постоянной, но изменяется с энергией тела. Инертная масса системы тел может рассматриваться как мера энергии этой системы. Закон сохранения массы системы совпадает с законом сохранения энергии и выполняется потому, что система не получает и не отдает энергию. Записав выражение для энергии в виде

$$\frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

увидим, что член mc^2 , уже встречавшийся ранее, есть не что иное, как энергия, которую имело тело² до получения энергии E_0 .

Непосредственное сравнение этого заключения с опытом пока что невозможно потому, что изменения энергии E_0 , которые мы можем сообщить телу, недостаточно велики, чтобы их можно было заметить как изменения инертной массы системы. Величина E_0/c^2

¹ Здесь E_0 — полученная телом энергия при наблюдении из системы координат, движущейся вместе с телом.

² С точки зрения системы координат, движущейся вместе с телом.

слишком мала по сравнению с массой m , которую имело тело до изменения энергии. Этим обстоятельством объясняется тот факт, что закон сохранения массы с успехом мог иметь самостоятельное значение.

Сделаем еще одно принципиальное замечание. Успех объяснения Фарадеем и Максвеллом электромагнитного дальнего действия с помощью промежуточных процессов, имеющих конечную скорость распространения, привел физиков к убеждению, что непосредственные, мгновенные дальние действия типа ньютоновского закона тяготения в действительности не существуют. Согласно теории относительности, вместо мгновенного действия на расстоянии или дальнего действия с бесконечной скоростью распространения должно существовать дальнее действие со скоростью света. Это обстоятельство связано с той принципиальной ролью, которую скорость c играет в этой теории. Во второй части настоящей работы будет показано, каким образом этот результат видоизменяется в общей теории относительности.

§ 16. Специальная теория относительности и опыт

Ответ на вопрос, в какой мере специальная теория относительности подтверждается опытом, невозможно дать по одной причине, о которой мы уже упоминали в связи с фундаментальным опытом Физо. Специальная теория относительности выкристаллизовалась из теории Максвелла — Лоренца электромагнитных явлений. Тем самым, все опытные данные, подтверждающие эту теорию электромагнитных явлений, подтверждают и теорию относительности. Упомяну здесь в качестве особенно важного факта, что теория относительности чрезвычайно просто и в согласии с опытом объясняет влияние движения Земли относительно неподвижных звезд на свет, испускаемый этими звездами. Этими эффектами являются: годичное перемещение кажущегося положения неподвижных звезд вследствие движения Земли вокруг Солнца (абберация) и влияние радиальной составляющей относительного движения неподвижных звезд по отношению к Земле на цвет посылаемого звездами света; последний эффект проявляется в небольшом смещении спектральных линий доходящего до нас света неподвижной звезды по сравнению с положением тех же спектральных линий, получаемых от земных источников света (принцип Доплера). Экспериментальные аргументы в пользу теории Максвелла — Лоренца, являющиеся вместе с тем и аргументами в пользу теории относительности, слишком многочисленны, чтобы излагать их здесь. В действительности они настолько сузили число теоретических возможностей, что без противоречия опыту нельзя отстаивать никакую другую теорию, кроме теории Максвелла — Лоренца.

Однако имеется два класса экспериментальных данных, которые могут быть объяснены теорией Максвелла — Лоренца лишь с помощью вспомогательной гипотезы; причем эта гипотеза сама по себе, т. е. без привлечения теории относительности, выглядит странной.

Известно, что катодные лучи и так называемые β -лучи, испускаемые радиоактивными веществами, состоят из отрицательно заряженных частиц (электронов), обладающих весьма незначительной инертной массой и большими скоростями. Исследуя отклонение этих лучей в электрическом и магнитном полях, можно очень точно изучить закон движения этих частиц.

При теоретическом изучении этих электронов встречаются затруднения, заключающиеся в том, что одна электродинамика ничего не может сказать об их природе. В самом деле, поскольку электрические заряды *одного* знака отталкиваются, то образующие электрон отрицательные электрические заряды должны бы были разлетаться вследствие взаимодействия, если бы между ними не существовали еще силы другого рода, природа которых нам до сих пор неизвестна¹. Если теперь предположить, что относительные расстояния электрических зарядов, образующих электрон, остаются неизменными при движениях электрона (жесткая связь в смысле классической механики), то мы приходим к закону движения электрона, не согласующемуся с опытом. Г. А. Лоренц с чисто формальной точки зрения впервые выдвинул гипотезу, согласно которой части электрона при движении испытывают сокращение в направлении движения, пропорциональное величине $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Эта гипотеза, ничем не оправдываемая с электродинамической точки зрения, приводит к закону движения, с большой точностью подтвержденному опытом в последние годы.

Теория относительности выводит этот же закон движения, не прибегая к какой-либо специальной гипотезе о строении и поведении электрона. Как мы видели в § 13, аналогично обстоит дело и с опытом Физо, результаты которого были объяснены теорией относительности без каких-либо гипотез о физической природе жидкости.

Второй класс фактов, на которые было указано выше, касается вопроса о том, можно ли в опытах, производимых на Земле, обнаружить движение последней в мировом пространстве. В § 5 уже было отмечено, что все такие усилия дали отрицательный результат. До установления теории относительности это отрицательное обстоятельство ставило науку в затруднительное положение; а именно, ситуация была следующей. Предубеждения о пространстве и времени, унаследованные от механики Галилея — Ньютона, не позволяли сомневаться в том, что переход от одного тела отсче-

та к другому определяется преобразованием Галилея. Если предположить, что уравнения Максвелла — Лоренца справедливы для некоторого тела отсчета K , то мы найдем, что они не выполняются для тела отсчета K' , равномерно движущегося относительно K , если принять, что координаты в системе K связаны с координатами в системе K' преобразованием Галилея. Отсюда, по-видимому, следует, что из всех галилеевых систем координат физически выделена одна система (K), движущаяся определенным образом. Физическая интерпретация этого результата состоит в том, что система K рассматривается как покоящаяся относительно гипотетического светового эфира. Напротив, все движущиеся относительно K системы координат K' должны быть движущимися относительно эфира. Этому движению K' относительно эфира («эфирному ветру» в системе K') приписывали более сложные законы, которые должны были бы выполняться относительно K' . Приходилось предполагать, что такой эфирный ветер должен существовать и относительно Земли, и физики стремились обнаружить этот ветер.

Майкельсон нашел для этого путь, который, казалось, должен был привести к цели. Представим себе, что на твердом теле прикреплены два зеркала, отражающие поверхности которых направлены друг к другу. Луч света проходит от одного зеркала к другому и обратно за определенный промежуток времени T , если вся эта система покоится относительно светового эфира. Но вычисления дают другое время T' , если тело вместе с зеркалами движется относительно эфира. Более того, вычисления показывают, что это время T' при данной скорости v относительно эфира будет иным в том случае, когда тело движется перпендикулярно к плоскостям зеркал, чем в случае, когда оно движется параллельно этим плоскостям. Несмотря на то, что вычисленная разность этих промежутков времени исключительно мала, Майкельсон и Морли выполнили интерференционный эксперимент, в котором эта разность должна была отчетливо обнаруживаться. К большому смущению физиков, эксперимент дал отрицательный результат. Лоренц и Фицджеральд вывели теорию из этого затруднительного положения, предположив, что движение тела относительно эфира вызывает сокращение тела в направлении движения, и следствием этого сокращения является исчезновение указанной разности промежутков времени. Такой выход из затруднения, как показывает сравнение с рассуждениями § 12, правилен и с точки зрения теории относительности. Но истолкование, предлагаемое теорией относительности, несравненно более удовлетворительно. Согласно этой теории не существует никакой привилегированной системы координат, которая давала бы повод для введения концепции эфира, а следовательно, и эфирного ветра, а также эксперимента, способного доказать его существование. Сокращение движущихся тел следует здесь без особых гипотез из обоих основных принципов

¹ С точки зрения общей теории относительности можно предположить, что электрические заряды электрона удерживаются силами тяготения.

теории, причем это сокращение определяется не движением самим по себе, которое для нас не имеет никакого смысла, а движением относительно избранного в данном случае тела отсчета. Следовательно, тело с зеркалами Майкельсона и Морли не сокращается в системе отсчета, движущейся вместе с Землей; но сокращение происходит относительно системы, покоящейся относительно Солнца.

§ 17. Четырехмерное пространство Минковского

Когда нематематик слышит о «четырехмерном», его охватывает мистическое чувство, подобное чувству, возбуждаемому театральными привидениями. Тем не менее нет более банального утверждения, что окружающий нас мир представляет собой четырехмерный пространственно-временной континуум.

Пространство представляет собой трехмерный континуум. Это значит, что положение (покоящейся) точки можно описать тремя числами (координатами) x, y, z и что около каждой точки имеются сколь угодно близкие «соседние» точки, положение которых может быть описано такими значениями координат (координатами) x_1, y_1, z_1 , которые могут быть сколь угодно близки к координатам x, y, z исходной точки. Благодаря последнему свойству мы говорим о «континууме» (непрерывности), а ввиду того, что число координат равно трем — о его «трехмерности».

Аналогично, мир физических явлений, названный Минковским просто «миром», естественно является четырехмерным в пространственно-временном смысле. В самом деле, он складывается из отдельных событий, каждое из которых описывается четырьмя числами, а именно: тремя пространственными координатами x, y, z и временной координатой — значением времени t . «Мир» в этом смысле является также непрерывным (континуумом); для каждого события имеются сколь угодно близкие «соседние» (происходящие или мыслимые) события, координаты которых x_1, y_1, z_1, t_1 сколь угодно мало отличаются от координат первоначально наблюдавшегося события x, y, z, t . Тот факт, что мы обычно не рассматриваем мир в этом смысле как четырехмерный континуум, объясняется тем, что время в дорелятивистской физике играет иную, более самостоятельную по сравнению с пространственными координатами роль. Поэтому и выработалась привычка рассматривать время как самостоятельный континуум. В самом деле, в классической физике время абсолютно, т. е. не зависит от *положения и состояния движения* системы отсчета. Это находит свое выражение в последнем уравнении преобразования Галилея ($t = t'$).

Благодаря теории относительности появляется возможность четырехмерной трактовки «мира», так как в этой теории время утрачивает свою самостоятельность, как показывает четвертое уравнение преобразования Лоренца:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Действительно, согласно этому уравнению, разность $\Delta t'$ времен двух событий относительно K' , вообще говоря, не обращается в нуль и тогда, когда разность времен Δt этих событий относительно K исчезает. Чисто пространственному расстоянию двух событий относительно системы отсчета K соответствует расстояние во времени этих же событий относительно K' . Однако и не в этом заключается открытие Минковского, важное для формального развития теории относительности. Оно состоит скорее в осознании того, что четырехмерный пространственно-временной континуум теории относительности по своим основным формальным свойствам глубоко родственен трехмерному континууму евклидовой геометрии¹. Для полного выявления этого родства необходимо вместо обычной временной координаты t ввести пропорциональную ей мнимую величину $\sqrt{-1}ct$. Но тогда законы природы, удовлетворяющие требованиям (специальной) теории относительности, принимают такую математическую форму, в которой временная координата играет точно такую же роль, как и три пространственные координаты. Формально эти четыре координаты совершенно точно соответствуют трем пространственным координатам евклидовой геометрии. Даже нематематику должно быть ясно, что благодаря этому чисто формальному положению теория относительности чрезвычайно выиграла в наглядности и стройности.

Эти краткие указания дают читателю лишь смутное представление о важных мыслях Минковского, без которых общая теория относительности, основные положения которой излагаются ниже, быть может, оставалась бы в зачаточном состоянии. Но более глубокое усвоение этого материала, несомненно трудного для читателя без математической подготовки, не является необходимым для понимания как специальной, так и общей теории относительности; поэтому мы оставим здесь изложение этого вопроса и снова вернемся к нему лишь на последних страницах этой работы.

¹ Ср. несколько более подробное изложение этого вопроса в Приложении II.

ОБ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

§ 18. Специальный и общий принцип относительности

Основным тезисом, вокруг которого развивалось все предшествующее изложение, был *специальный* принцип относительности, т. е. принцип физической относительности всякого *равномерного* движения. Тщательно проанализируем еще раз его содержание.

Всегда признавалось, что всякое движение, по определению, должно мыслиться как *относительное* движение. В неоднократно использовавшемся нами примере с полотном железной дороги и вагоном можно, например, с одинаковым правом говорить о движении в двух формах:

- а) вагон движется относительно полотна железной дороги;
- б) полотно железной дороги движется относительно вагона.

В случае «а» телом отсчета служит полотно дороги, а в случае «б» — вагон. При простом констатировании или описании движения принципиально безразлично, к какому телу отсчета относится движение. Это утверждение, как мы уже говорили, очевидно само собой и его не следует смешивать с более глубоким утверждением, которое мы называли «принципом относительности» и положили в основу наших исследований.

Примененный нами принцип утверждает не только то, что для описания любого события в качестве тела отсчета можно выбрать как вагон, так и полотно дороги (это также очевидно). Он утверждает значительно большее: если общие законы природы формулировать в том виде, как они получаются из опыта, пользуясь в качестве тела отсчета: а) полотном железной дороги, б) вагоном, то эти общие законы природы (например, законы механики или закон распространения света в пустоте) будут совершенно одинаковыми в обоих случаях. Это можно выразить также следующим образом: для физического описания процессов природы ни одно из тел отсчета K , K' не выделено среди других. Это последнее положение не обязано быть справедливым априори; оно не содержится в понятиях «движение» и «тело отсчета» и не выводится из них; вопрос о его справедливости может быть решен только опытом.

Однако до сих пор мы не утверждали равноценности *всех* тел отсчета K в отношении формулирования законов природы. Наш путь был следующим. Мы исходили прежде всего из предположения о существовании тела отсчета K , движущегося таким образом, что по отношению к K применим основной закон Галилея: материальная точка, предоставленная самой себе и достаточно удаленная от других материальных точек, движется равномерно и пря-

молинейно. По отношению к K (*галилеево* тело отсчета) законы природы должны выражаться возможно проще. Но кроме K , все тела отсчета K' , которые движутся относительно K *прямолинейно, равномерно и без вращения*, совершенно эквивалентны K при формулировании законов природы; все эти тела отсчета можно рассматривать как галилеевы. Справедливость принципа относительности предполагалась только для этих, но не для других (иначе движущихся) тел отсчета. В этом смысле мы говорим о *специальном* принципе относительности или о специальной теории относительности.

В противоположность этому под «общим принципом относительности» мы подразумеваем утверждение, что все тела отсчета K , K' и т. д. эквивалентны в отношении описания природы (формулирования общих законов природы), каким бы ни было их состояние движения. Заметим здесь же, что эта формулировка должна быть позднее заменена другой, более абстрактной, по причинам, которые выяснятся позже.

После того как введенный специальный принцип относительности нашел оправдание на опыте, всякому, кто стремится к обобщению, может показаться заманчивым сделать шаг и к общему принципу относительности. Но одно простое и, на первый взгляд, совершенно бесспорное соображение как будто обрекает подобную попытку на неудачу. Пусть читатель представит себе, что он находится в столь часто упоминавшемся нами равномерно движущемся вагоне железной дороги. Пока вагон движется равномерно, пассажир совершенно не замечает движения. Отсюда следует, что пассажир может без особого труда интерпретировать это событие таким образом, будто вагон покоится, а движется полотно дороги. Впрочем, с точки зрения специального принципа относительности эта интерпретация полностью оправдывается и с физической точки зрения.

Однако если движение вагона становится неравномерным, например при сильном торможении вагона, то пассажир испытывает сильный толчок вперед. Ускорение вагона проявляется в механическом движении тел по отношению к нему; механическая картина здесь иная, чем в предшествующем случае, и поэтому представляется невозможным, чтобы одинаковые механические законы были справедливы как относительно неравномерно движущегося вагона, так и по отношению к покоящемуся или равномерно движущемуся вагону. Во всяком случае ясно, что в отношении неравномерно движущегося вагона основной закон Галилея не выполняется. Поэтому сначала мы чувствуем себя вынужденными, вопреки общему принципу относительности, приписать неравномерному движению некоторого рода абсолютную физическую реальность. Однако мы скоро увидим, что этот вывод не основателен.

19. Поле тяготения

На вопрос: «Почему камень, который мы поднимаем и затем выпускаем из рук, падает на землю?» — обычно отвечают: «Потому что его притягивает Земля». Современная физика формулирует ответ несколько иначе по следующей причине. Более точное исследование электромагнитных явлений показало, что непосредственное действие на расстоянии не имеет места. Например, в случае притяжения магнитом куска железа нельзя удовлетвориться представлением, что магнит действует на железо непосредственно через пустое пространство между ними; согласно Фарадею, магнит вызывает появление в окружающем пространстве некоторой физической реальности, называемой «магнитным полем». В свою очередь, это магнитное поле воздействует на кусок железа так, что он стремится двигаться к магниту. Мы не будем обсуждать здесь законность этого, несколько произвольного, вспомогательного представления. Заметим лишь, что с его помощью можно дать значительно более удовлетворительное теоретическое описание электромагнитных явлений и в особенности распространения электромагнитных волн, чем без этого представления. Аналогичным образом истолковывается и действие тяготения.

Воздействие Земли на камень происходит не непосредственно. Земля создает в окружающем пространстве поле тяготения. Последнее действует на камень и вызывает его падение. Как показывает опыт, действующая на камень сила уменьшается с расстоянием от Земли по вполне определенному закону. Согласно нашему толкованию, это означает: закон, управляющий пространственными свойствами поля тяготения, должен быть вполне определенным, чтобы правильно описывать убывание силы тяготения с увеличением расстояния между взаимодействующими телами. Представим себе, что тело (например, Земля) в непосредственной близости от себя создает поле; величина и направление поля на большем расстоянии определяются отсюда законом, регулирующим пространственные свойства полей тяготения.

В противоположность электрическому и магнитному полям поле тяготения обладает одним, в высшей степени замечательным свойством, имеющим фундаментальное значение для дальнейшего. Тела, которые движутся исключительно под действием поля тяжести, испытывают ускорение, не зависящее ни от материала, ни от физического состояния тела. Например, кусок свинца и кусок дерева падают в поле тяжести (в безвоздушном пространстве) в точности одинаково, если они имеют одинаковую, в частности равную нулю, начальную скорость. Этот, исключительно точно выполняющийся закон можно также формулировать иначе на основе следующих соображений.

Согласно закону движения Ньютона,

$$(Сила) = (Инертная\ масса) \times (Ускорение),$$

где «инертная масса» представляет собой характерную постоянную ускоряемого тела. С другой стороны, если силой, вызывающей ускорение, является тяжесть, то

$(Сила) = (Тяжелая\ масса) \times (Напряженность\ поля\ тяжести)$,
где «тяжелая масса» также представляет собой постоянную, характеризующую тело. Из этих соотношений следует:

$$(Ускорение) = \frac{Тяжелая\ масса}{Инертная\ масса} \times (Напряженность\ поля\ тяжести).$$

Если, как показывает опыт, в заданном поле тяжести ускорение не зависит от природы и состояния тела, то и отношение тяжелой массы к инертной, равным образом, должно быть одинаковым для всех тел. Следовательно, это отношение при надлежащем выборе единиц можно положить равным единице. Тогда можно выдвинуть следующее положение: *тяжелая и инертная массы тела равны*.

До настоящего времени механика констатировала, но не истолковывала это важное положение. Удовлетворительное истолкование можно дать в следующей форме: в зависимости от обстоятельств одно и то же качество тела проявляется либо как «инерция», либо как «тяжесть». В какой мере это оправдывается в действительности и как связан этот вопрос с общим постулатом относительности, будет показано в следующих параграфах.

§ 20. Равенство инертной и тяжелой масс как аргумент в пользу общего постулата относительности

Представим себе обширную область пустого мирового пространства, настолько удаленную от звезд и значительных масс, что со значительной степенью точности осуществляется случай, предусмотренный основным законом Галилея. Тогда для этой части мира можно выбрать *галилеевское* тело отсчета, относительно которого покоящиеся точки остаются в покое, а движущиеся — в состоянии прямолинейного и равномерного движения. В качестве тела отсчета представим себе обширный ящик в виде комнаты; в нем находится наблюдатель, снабженный необходимыми приборами. Для него, естественно, тяжесть не существует. Он должен прикрепить себя к полу веревками, чтобы от малейшего удара о пол не всплывать медленно к потолку комнаты.

Пусть в центре крышки ящика с наружной стороны прикреплен трос, за который какое-то существо начинает тянуть ящик с постоянной силой. Тогда ящик с наблюдателем будет двигаться равномерно ускоренно «вверх». Его скорость с течением времени будет возрастать до фантастической величины, если наблюдать с другого тела отсчета, которое уже никто не тянет.

Как же судит об этом явлении человек, находящийся в ящике? Ускорение ящика передается ему давлением со стороны пола.

Следовательно, он будет воспринимать это давление своими ногами, если только не захочет прийти в соприкосновение с полом всем своим телом. При этом он стоит в ящике совершенно так же, как и в комнате своего дома на Земле. Если он выпускает из рук некоторое тело, то этому телу уже не будет передаваться ускорение ящика; поэтому оно будет приближаться к полу ящика с ускорением относительно последнего. Далее наблюдатель убедится, что *ускорение тела относительно пола ящика всегда одинаково, с каким бы телом ни производился опыт.*

Итак, человек в ящике, основываясь на своих сведениях о поле тяжести в том виде, как мы изложили их в последнем параграфе, придет к выводу, что он вместе с ящиком находится в постоянном во времени поле тяжести. Правда, какое-то время он будет удивлен тем, что сам ящик не падает в этом поле тяжести. Но затем он обнаружит в центре крышки крюк с прикрепленным к последнему натянутым тросом и придет к выводу, что ящик подвешен и покоится в поле тяжести.

Можем ли мы посмеяться над этим человеком и сказать, что его предположение ошибочно? Думаю, что мы не вправе поступить так, если хотим оставаться последовательными; мы должны также признать, что его предположение не содержит ни логических противоречий, ни противоречий с известными законами механики. Мы можем рассматривать ящик покоящимся, если даже он движется ускоренно относительно упомянутого выше «галилеевского пространства». Следовательно, мы имеем достаточное основание распространить принцип относительности на тела отсчета, движущиеся ускоренно одно относительно другого; таким путем мы получаем сильный аргумент в пользу обобщенного постулата относительности.

Следует учесть, что возможность такого понимания основывается на фундаментальном свойстве поля тяжести сообщать всем телам одно и то же ускорение или, иными словами, на равенстве инертной и тяжелой масс. Если бы этот закон природы не существовал, человек в движущемся с ускорением ящике не мог бы объяснить поведение окружающих его тел с помощью предположения о существовании поля тяжести, и никакой опыт не давал бы ему основания считать, что его тело отсчета «находится в состоянии покоя».

Пусть человек в ящике прикрепил внутри ящика к его крышке веревку и к свободному концу ее привязал какое-либо тело. Под действием последнего веревка будет натянута в «вертикальном» направлении. Мы ставим вопрос о причине натяжения веревки. Человек в ящике скажет: «Подвешенное тело испытывает действие силы тяжести, направленной вниз и уравновешиваемой натяжением веревки; то, чем определяется натяжение веревки, это *тяжелая масса подвешенного тела*». Но, с другой стороны, наблюдатель, который свободно парит в пространстве, так объяснит натяжение веревки: «Веревка ускоренно движется вместе с ящиком и пере-

дает это ускорение прикрепленному к нему телу. Величина натяжения веревки такова, что она сообщает данное ускорение телу. Величина натяжения веревки определяется *инертной массой тела*». Из этого примера видно, что из нашего обобщения принципа относительности с необходимостью следует положение о равенстве инертной и весомой масс. Тем самым мы получаем физическую интерпретацию этого положения.

Рассмотрение явлений в ускоренно движущемся ящике показывает, что общая теория относительности должна привести к важным выводам о законах тяготения. Фактически последовательное проведение идеи общего принципа относительности привело к законам, которым удовлетворяет поле тяготения. Однако я здесь же должен предостеречь читателя от одного недоразумения, которое легко может возникнуть при этих рассуждениях. Для человека в ящике существует поле тяготения, в то время как для первоначально выбранной системы координат таковое не существует. В связи с этим можно подумать, что существование поля тяготения всегда является лишь кажущимся. Можно также подумать, что в любом поле тяготения всегда можно выбрать такое другое тело отсчета, относительно которого никакого поля тяготения не существует. Однако это возможно отнюдь не для всех полей тяготения, но лишь для полей весьма специальной структуры. Так, например, невозможно выбрать такое тело отсчета, чтобы при наблюдении с него поле тяготения Земли (на всем его протяжении) исчезало.

Теперь мы видим, почему не убедителен аргумент против общего принципа относительности, приведенный в конце § 18. Конечно, совершенно правильно, что наблюдатель, находящийся в заторможенном железнодорожном вагоне, вследствие торможения испытывает толчок вперед и тем самым замечает неравномерность движения (ускорение) вагона. Но ничто не заставляет его объяснять этот толчок «истинным» ускорением вагона. Свое ощущение он может интерпретировать иначе: «Мое тело отсчета (вагон) продолжительное время остается в состоянии покоя. Но в вагоне (в течение времени торможения) действует поле тяжести, направленное вперед по движению и меняющееся во времени. Под влиянием этого поля железнодорожное полотно вместе с Землей движется неравномерно, так что его первоначальная, направленная назад, скорость постоянно уменьшается. Именно это поле тяжести и дает толчок, который испытывает наблюдатель».

21. Насколько полны основы классической механики и специальной теории относительности?

Уже неоднократно упоминалось, что классическая механика исходит из следующего положения: материальные точки, достаточно удаленные от других материальных точек, движутся

прямолинейно и равномерно или же находятся в состоянии покоя. Мы также неоднократно указывали, что этот основной закон выполняется лишь для тел отсчета K , находящихся в определенном состоянии движения, а именно движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга. По отношению к другим телам отсчета это положение несправедливо. Как в классической механике, так и в специальной теории относительности различают тела отсчета K , относительно которых законы природы выполняются, и тела отсчета K' , относительно которых законы природы не выполняются.

Но такое положение вещей не может удовлетворить последовательно мыслящего человека. Он задает вопрос: «Каким образом возможно такое положение, что определенные тела отсчета (или их состояния движения) отличаются от других тел отсчета (или их состояний движения)? Какое основание для такого предпочтения?» Чтобы ясно показать, что я подразумеваю под этим вопросом, воспользуюсь таким сравнением.

Я стою перед газовой плитой. На ней поставлены рядом два совершенно одинаковых чайника. Оба они до половины наполнены водой. Я замечаю, что из одного непрерывно поднимается пар, а из другого нет. Я удивлен этим больше, чем зрелищем газовой плиты и чайников, хотя бы ранее мне никогда не приходилось их видеть. Но если я замечаю, что под первым чайником светится нечто голубое, а под другим нет, то мое удивление исчезает, если даже я никогда не видел газового пламени. Я могу лишь сказать, что это голубоватое нечто вызывает (или, по крайней мере, *может быть* вызывает) возникновение пара. Однако если я не замечаю этого нечто голубоватого ни под одним из чайников и в то же время вижу, что в одном из них вода непрерывно кипит, а в другом нет, то я останусь удивленным и неудовлетворенным до тех пор, пока не открою какого-либо обстоятельства, на которое я могу возложить ответственность за различное поведение обоих чайников.

Аналогично, тщетно было бы искать в классической механике (а также в специальной теории относительности) то реальное нечто, к которому можно было бы свести различное поведение тел относительно систем отсчета K и K' ¹. Это возражение предвидел уже Ньютон, который тщетно стремился ослабить его. Однако яснее всего его понял Э. Мах, который выдвинул требование, чтобы механика была построена на новом основании. Этого возражения может избежать только физика, основанная на общем принципе относительности. Уравнения такой теории справедливы для любого тела отсчета, в каком бы состоянии движения оно ни находилось.

¹ Это возражение приобретает особое значение в том случае, когда состояние движения тела отсчета таково, что для своего сохранения оно не нуждается во внешнем воздействии, например в случае равномерного вращения тела отсчета.

§ 22. Некоторые выводы из общего принципа относительности

Рассуждения в § 20 показывают, что общий принцип относительности дает нам возможность вывести чисто теоретическим путем свойства гравитационного поля. Именно, пусть нам известно пространственно-временное развитие какого-либо естественного процесса, происходящего в галилеевом пространстве относительно галилеева тела отсчета K . Тогда посредством чисто теоретических операций, т. е. лишь с помощью вычислений, можно найти, как будет протекать этот процесс относительно тела отсчета K' , движущегося с ускорением относительно K . Но так как относительно этого нового тела отсчета K' существует гравитационное поле, то таким путем мы найдем, как влияет гравитационное поле на изучаемый процесс.

Мы узнаем, например, что тело, движущееся относительно K прямолинейно и равномерно (в соответствии с законом Галилея), относительно ускоренно движущегося тела отсчета K' (ящика) совершает ускоренное, вообще говоря, криволинейное движение. Это ускорение и кривизна соответствуют влиянию на движущееся тело гравитационного поля, существующего относительно K' . Такое влияние гравитационного поля на движение тел известно, так что эти рассуждения не вносят ничего принципиально нового.

Однако получается новый фундаментальный результат, если провести соответствующее рассуждение применительно к световому лучу. Свет распространяется относительно галилеевского тела отсчета K по прямой линии со скоростью c . Относительно же движущегося с ускорением ящика (тело отсчета K') путь того же светового луча, как легко показать, уже не будет представлять собой прямую линию. Отсюда следует заключить, что в гравитационных полях световые лучи распространяются, вообще говоря, по криволинейному пути. Этот вывод важен в двух отношениях.

Во-первых, этот вывод можно проверить экспериментально. Хотя при ближайшем рассмотрении оказывается, что искривление световых лучей, согласно общей теории относительности, крайне незначительно для гравитационных полей, доступных нашему опыту, тем не менее для световых лучей, проходящих вблизи Солнца, искривление должно составлять 1,7 угловых секунды. Это должно было бы проявляться в том, что неподвижные звезды, видимые вблизи Солнца при полных солнечных затмениях, казались бы смещенными на указанную величину по сравнению с тем положением, которое они занимают в том случае, когда Солнце находится в другом месте неба. Проверка правильности этого вывода представляет собой задачу чрезвычайной важности, и мы надеемся на скорое решение ее астрономами¹.

¹ Существование требуемого теорией отклонения света было экспериментально установлено во время солнечного затмения 29 мая 1919 г. двумя

Во-вторых, этот вывод показывает, что закон постоянства скорости света в пустоте, представляющий собой одну из двух основных предпосылок специальной теории относительности, не может, согласно общей теории относительности, претендовать на неограниченную применимость. Изменение направления световых лучей может появиться лишь в том случае, если скорость распространения света меняется в зависимости от места. Можно было бы думать, что вследствие этого вывода становится несостоятельной специальная теория относительности, а вместе с ней и теория относительности вообще. На самом же деле это не так. Можно лишь заключить, что специальная теория относительности не может претендовать на неограниченную применимость; ее результаты применимы лишь до тех пор, пока можно не учитывать влияние гравитационного поля на физические явления (например, световые).

Поскольку противники теории относительности часто утверждали, что общая теория относительности опровергает специальную теорию относительности, для разъяснения действительного положения вещей обратимся к сравнению. До установления электродинамики законы электростатики считались просто законами электрических явлений. Теперь мы знаем, что электростатика может дать правильное описание электрического поля лишь в том, никогда строго не реализующемся случае, когда электрические массы покоятся относительно друг друга и относительно системы координат. Опровергается ли тогда электростатика электродинамическими уравнениями Максвелла? никоим образом! Электростатика содержится в электродинамике в качестве предельного случая; законы электродинамики приводят непосредственно к электростатике в случае полей, не зависящих от времени. Лучший удел физической теории состоит в том, чтобы указывать путь создания новой, более общей теории, в рамках которой она сама остается предельным случаем.

В только что приведенном примере распространения света мы видели, что общий принцип относительности дает нам возможность теоретически определить влияние поля тяготения на течение процессов, законы которых в отсутствие поля тяготения уже известны. Однако наиболее увлекательной задачей, ключ к решению которой дает общий принцип относительности, является отыскание закона, которому подчиняется само гравитационное поле. Здесь дело заключается в следующем.

Мы знаем пространственно-временные области, которые при соответствующем выборе тела отсчета обладают (приблизительно) «галилеевскими» свойствами, т. е. области, в которых гравитационные поля отсутствуют. Если такую область мы отнесем теперь

английскими экспедициями Королевского и Королевского астрономического обществ под руководством астрономов Эддингтона и Кроммелина. (См. Приложение III.)

и любому движущемуся телу отсчета K' , то относительно K' будем иметь переменное во времени и пространстве гравитационное поле¹. Свойства этого поля зависят, очевидно, от того, каким мы выберем движение тела отсчета K' . Общий закон гравитационного поля должен, согласно общей теории относительности, выполняться для всех получаемых таким образом гравитационных полей. Хотя отнюдь не все гравитационные поля могут быть созданы таким путем, все же можно надеяться вывести из этих специального типа гравитационных полей общий закон гравитации. Эта надежда блестяще оправдалась! Но между ясным пониманием этой цели и ее действительным осуществлением остается преодолеть еще одну серьезную трудность, о которой я не могу умолчать перед читателем, так как она связана с существом вопроса. Нам необходимо еще раз углубить понятие пространственно-временного континуума.

§ 23. Поведение часов и масштабов на вращающихся телах отсчета

До сих пор я умышленно не говорил о физической интерпретации пространственных и временных отсчетов в случае общей теории относительности. Тем самым я допустил некоторую небрежность, которая, как мы знаем из специальной теории относительности, никоим образом не является несущественной и простиительной. Теперь весьма своевременно восполнить этот пробел; однако замечу, что это потребует от читателя терпения и способности к абстрактному мышлению.

Мы опять исходим из много раз использованных, но весьма частных примеров. Рассмотрим пространственно-временную область, в которой относительно тела отсчета K , движущегося соответствующим образом, не существует никакого гравитационного поля; тогда K в отношении данной области является галилеевым телом отсчета и к нему применимы выводы специальной теории относительности. Отнесем ту же область ко второму телу отсчета K' , равномерно вращающемуся относительно K . Для того чтобы картину сделать наглядной, представим себе K' в виде плоского диска, равномерно вращающегося вокруг оси, перпендикулярной его плоскости и проходящей через его центр. Наблюдатель, который сидит не в самом центре диска K' , подвергается действию силы, направленной радиально от центра; наблюдатель, находящийся в покое относительно первого тела отсчета K , будет считать эту силу действием инерции (центробежной силой). Пусть, однако, наблюдатель, находящийся на диске, рассматривает этот диск как «покоящееся» тело отсчета; он вправе это сделать на основании общего принципа относительности. Силу, которая действует на него и

¹ Это следует из обобщения рассуждений в § 20.

вообще на тела, покоящиеся относительно диска K' , он считает действием гравитационного поля. Правда, пространственное распределение этого поля тяжести не может быть согласовано с законом всемирного тяготения Ньютона¹. Но наблюдатель убежден в справедливости общего принципа относительности, и это его не смущает; он справедливо надеется, что можно установить такой общий закон тяготения, который правильно объяснит не только движение созвездий, но и наблюдаемое им силовое поле.

Наблюдатель, находясь на диске, производит эксперименты с часами и измерительными стержнями, стремясь на основании своих наблюдений дать точное определение временным и пространственным отсчетам относительно диска K' . Какие при этом эксперименты он будет производить?

Прежде всего наблюдатель должен поместить двое одинаковых часов: одни — в центре диска, другие — на его периферии, так что и те и другие покоятся относительно диска. Сначала мы спросим, одинаково ли будут идти эти двое часов с точки зрения невращающегося галилеева тела отсчета K . Относительно этого тела часы, находящиеся в центре, покоятся, тогда как часы, расположенные на периферии, движутся вследствие вращения относительно K . Поэтому, согласно одному из выводов § 12, часы на периферии, с точки зрения тела отсчета K , будут идти медленнее, чем часы в центре диска. То же самое, очевидно, должен был бы констатировать и человек на диске, если мы представим его сидящим почти в центре диска, вблизи соответствующих часов. Следовательно, на таком диске и вообще во всяком гравитационном поле часы будут идти быстрее или медленнее, в зависимости от места, где они расположены (покоятся). Таким образом, разумное определение времени с помощью часов, неподвижных относительно тела отсчета, невозможно. Подобная же трудность возникает и при попытке применить здесь ранее данное нами определение одновременности, но я не буду подробно останавливаться на этом.

Но в данном случае и определение пространственных координат с самого начала встречает непреодолимые трудности. Именно, если наблюдатель, движущийся вместе с диском, приложит свой единственный масштаб (линейку, длина которой очень мала по сравнению с радиусом диска) по касательной к внешнему краю диска, то этот масштаб, с точки зрения галилеевой системы, будет короче единицы длины, так как согласно § 12 движущиеся тела испытывают сокращение в направлении движения. Если же масштаб приложить в направлении радиуса диска, то он, с точки зрения K , не сокращается. Следовательно, если наблюдатель измерит своим масштабом сначала длину окружности диска, а затем его диаметр, и разделит первый результат измерения на второй, то получит для

отношения не общеизвестное число $\pi = 3,14\dots$, а большее число¹; и то же время, если сам диск покоится относительно K , то мы должны при этой операции получить в точности число π . Тем самым доказано, что положения геометрии Эвклида не могут точно выполняться на вращающемся диске и, таким образом, вообще в гравитационном поле, по крайней мере в случае, когда масштабы во всех точках и при всех ориентациях приписывается длина, равная единице. При этом понятие прямой также теряет свой смысл. Поэтому мы не можем точно определить координаты x, y, z относительно диска с помощью метода, использованного в специальной теории относительности. Но если не определены ни координаты, ни времена событий, то не имеют точного смысла и законы природы, в которые входят эти координаты.

Все это ставит под сомнение правильность изложенных выше рассуждений об общей относительности. На самом деле, для точного применения общего принципа относительности требуется тонкий обходной путь. Последующим изложением читатель должен быть подготовлен к нему.

§ 24. Эвклидов и неэвклидов континуум

Пусть передо мной поверхность мраморного стола. Я могу перейти от какой-либо точки поверхности к любой другой точке, переходя большое число раз к «соседним» точкам, или, другими словами, переходя от точки к точке без «скачков». Читатель, по-видимому, достаточно ясно понимает (если только он не очень придирчив), что означает здесь понятие «соседний» и «скачки». Эту же мысль мы выражаем, утверждая, что поверхность представляет собой континуум.

Теперь представим себе большое количество небольших по сравнению с размерами стола линеек одинаковой длины; это значит, что концы любой пары линеек совпадают при наложении. Расположим на поверхности стола четыре линейки таким образом, чтобы они образовали четырехугольник, диагонали которого равны между собой (квадрат). Чтобы обеспечить равенство диагоналей, мы пользуемся контрольной линейкой. К этому квадрату мы подстраиваем такие же квадраты, имеющие одну общую сторону с первым; таким же образом рядом с этими последними квадратами строим новые и т. д. В конце концов вся поверхность стола будет покрыта квадратами, причем каждая сторона является общей для двух квадратов и каждая вершина — для четырех квадратов.

То, что это можно сделать без больших трудностей — истинное чудо! Достаточно только подумать о следующем. Если в неко-

¹ Во всех этих рассуждениях в качестве тела отсчета следует применять галилееву (невращающуюся) систему K , так как выводы специальной теории относительности справедливы лишь относительно K (относительно же K' существует гравитационное поле).

¹ Поле обращается в нуль в центре диска и растет к периферии пропорционально расстоянию от центра.

торой вершине уже сходятся три квадрата, то тем самым уже имеются две стороны четвертого квадрата. Этим уже полностью определено, как должны быть уложены остальные две стороны. Но теперь я уже не могу составить четырехугольник так, чтобы его диагонали были равны. Если они уже равны сами по себе, то это объясняется особо благоприятными свойствами стола и линеек, которым я могу только удивляться! С подобным чудом мы должны были сталкиваться неоднократно, если это построение нам удалось довести до конца.

Если все это удалось действительно гладко, то можно утверждать, что точки поверхности стола образуют евклидов континуум относительно использованных линеек в качестве отрезков. Взяв вершину одного из квадратов за «начальную точку», я могу охарактеризовать любую другую вершину одного из квадратов по отношению к начальной точке двумя числами. Чтобы достигнуть рассматриваемой вершины квадрата, я должен указать, сколько линеек я должен отложить «вправо» и сколько — «вверх» от начальной точки. Тогда эти два числа и будут представлять собой «декартовы координаты» указанной вершины относительно определяемой уложенными линейками «декартовой системы координат».

То, что существуют случаи, когда подобный эксперимент не удастся, можно увидеть, несколько изменив этот мысленный эксперимент. Как линейки должны «удлиняться» в зависимости от температуры? Пусть крышка стола нагрета в середине, а по краям остается ненагретой, причем любые две наши линейки по-прежнему могут быть совмещены друг с другом в любом месте стола. Но при этом наша конструкция из квадратов неизбежно должна расстроиться, так как линейки в середине стола удлинились, а линейки у краев стола — нет.

По отношению к нашим линейкам, определенным в качестве единиц длины, поверхность стола уже не будет евклидовым континуумом, и мы уже не в состоянии непосредственно определить с ее помощью декартовы координаты, так как вышеописанное построение более невыполнимо. Однако имеются другие предметы, на которые температура стола влияет иначе, чем на наши линейки (или вовсе не влияет), и, следовательно, можно естественным путем сохранить представление о поверхности стола как об «евклидовом континууме»; это может быть достигнуто удовлетворительным образом более тонким определением понятия измерения, т. е. сравнения отрезков.

Но если бы длина линеек любого рода, т. е. из любых материалов, одинаковым образом зависела от температуры на неодинаково нагретой поверхности стола и если бы у нас не было другого средства установить влияние температуры, кроме геометрических свойств линеек при опытах, аналогичных описанному выше, то было бы целесообразно принять за единицу расстояние между двумя точками на поверхности стола, если концы одной из наших ли-

неек совпадают с этими точками. В самом деле, как можно было бы иначе определить отрезок без явного произвола? Однако в таком случае мы должны отказаться от метода декартовых координат и заменить его другим методом, который не предполагал бы применимости евклидовой геометрии к твердым телам¹. Читатель замечает, что описанное здесь положение соответствует тому, которое привело к общему принципу относительности (см. § 23).

§ 25. Гауссовы координаты

Аналитико-геометрический метод рассмотрения может быть, согласно Гауссу, описан следующим образом. Представим себе, что на поверхности стола нанесена система некоторых кривых (рис. 4), которые мы назовем u -кривыми и пронумеруем их какими-либо числами. На рис. 4 изображены кривые $u = 1$, $u = 2$ и $u = 3$. Но между кривыми $u = 1$ и $u = 2$ следует представить себе бесконечно много кривых, которые соответствуют всем вещественным числам между 1 и 2. Тогда получается система u -кривых, которые бесконечно плотно покрывают всю поверхность стола. Ни одна кривая u не должна пересекать другую; через каждую точку поверхности стола проходит одна и только одна кривая. Тогда каждой точке поверхности стола соответствует совершенно определенное значение u . Начертим на той же поверхности систему v -кривых, которые удовлетворяют тем же условиям и обозначены соответствующим образом числами, но также могут иметь произвольную форму. Тогда каждой точке поверхности стола соответствует одно значение u и одно значение v ; эти два числа мы назовем координатами поверхности стола (гауссовы координаты). Например, тогда P на рис. 3 имеет гауссовы координаты $u = 3$; $v = 1$. Тогда две соседние точки P и P' на поверхности соответственно имеют координаты

$$u, v \\ u + du, v + dv,$$

¹ Математики формулируют нашу задачу следующим образом. Если в трехмерном евклидовом метрическом пространстве дана некоторая поверхность, например эллипсоид, то на этой поверхности, так же как на плоскости, выполняется двумерная геометрия. Гаусс поставил перед собой задачу исследовать эту двумерную геометрию, не предполагая, что поверхность принадлежит евклидову континууму трех измерений. Если на этой поверхности осуществляются построения из жестких линеек (аналогичные описанному выше построению на поверхности стола), то для этих построений выполняются уже иные законы, отличные от законов евклидовой геометрии на плоскости. Поверхность не будет евклидовым континуумом в отношении линеек, и на поверхности нельзя определить декартовы координаты. Гаусс показал, на каких принципах может быть основана трактовка геометрических соотношений на поверхности, и тем самым указал путь к риманову методу исследования многомерных неевклидовых континуумов. Таким образом, математиками уже давно решены формальные проблемы, к которым приводит общий принцип относительности.

где du и dv означают весьма малые числа. Расстояние между P и P' , измеренное линейкой, также является весьма малым числом ds . Тогда, согласно Гауссу, мы имеем

$$ds^2 = g_{11}du^2 + 2g_{12}du dv + g_{22}dv^2,$$

где g_{11} , g_{12} , g_{22} — величины, которые вполне определенным образом зависят от u и v . Величины g_{11} , g_{12} и g_{22} определяют поведение линеек по отношению к u -кривым и v -кривым, а следовательно, по отношению к поверхности стола.

Только в том случае, когда точки рассматриваемой поверхности образуют евклидов континуум (по отношению к измерительным линейкам), можно начертить u -кривые и v -кривые и приписать им числа таким образом, что

$$ds^2 = du^2 + dv^2.$$

В этом случае u -кривые и v -кривые становятся прямыми линиями в смысле евклидовой геометрии, причем перпендикулярными друг другу. Здесь гауссовы координаты являются просто декартовыми координатами. Гауссовы координаты, оче-

видно, и есть сопоставление каждой точке рассматриваемой поверхности пары чисел, причем такое, что очень мало различающимся численным значениям однозначно соответствуют соседние точки в пространстве.

Это рассуждение применимо прежде всего к двумерному континууму. Но метод Гаусса может быть применен также к континууму трех, четырех и более измерений. Если, например, имеется четырехмерный континуум, мы можем представить его следующим образом. Каждой точке континуума мы произвольно ставим в соответствие четыре числа x_1, x_2, x_3, x_4 , которые называются «координатами». Соседние точки соответствуют соседним значениям координат. Если соседним точкам P и P' сопоставлено расстояние ds , измеренное и вполне определенное с физической точки зрения, то выполняется следующая формула:

$$ds^2 = g_{11}dx_1^2 + 2g_{12}dx_1dx_2 + \dots + g_{44}dx_4^2,$$

где величины g_{11} и т. д. имеют значения, которые изменяются от точки к точке в континууме. Лишь в том случае, когда континуум является евклидовым, координаты x_1, x_2, x_3, x_4 можно связать с точками континуума так, что мы получаем формулу

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2.$$

Тогда в четырехмерном континууме выполняются соотношения, которые аналогичны соотношениям, справедливым для измерений в трехмерном пространстве.

Правда, приведенная выше гауссовская трактовка ds^2 не всегда возможна; она возможна лишь в том случае, когда достаточно малые области рассматриваемого континуума можно считать евклидовыми континуумами. Например, это осуществляется, очевидно, в случае неравномерно нагретой доски стола, температура которой изменяется в зависимости от места. Температура малой части доски стола практически постоянна, и таким образом геометрические свойства линеек почти такие, какими они должны быть в соответствии с правилами евклидовой геометрии. Следовательно, указанные в предыдущем параграфе затруднения в построении квадратов не проявятся четко до тех пор, пока это построение не распространено на значительную часть поверхности стола.

Резюмируя, мы можем сказать следующее: Гаусс предложил метод математического описания любого континуума, в котором определены метрические соотношения («расстояния» между соседними точками). Каждой точке континуума приписывается столько чисел (гауссовых координат), сколько измерений имеет континуум. Способ приписания выбран таким, чтобы он был однозначным и чтобы соседним точкам соответствовали числа (гауссовы координаты), отличающиеся на бесконечно малую величину. Гауссова система координат является логическим обобщением декартовой. Она применима также и к неевклидовым континуумам, но лишь тогда, когда малые по отношению к определенному размеру («расстоянию») части рассматриваемого континуума тем более похожи на евклидов континуум, чем меньше рассматриваемая часть континуума.

§ 26. Пространственно-временной континуум специальной теории относительности как евклидов континуум

Теперь мы можем несколько точнее сформулировать мысль Минковского, которая лишь в общих чертах намечена в § 17. Согласно специальной теории относительности, преимущества для описания четырехмерного пространственно-временного континуума дают определенные системы координат. Мы назвали их «галилеевыми системами координат». Для этих систем четыре координаты x, y, z, t , которые определяют некоторое событие, или, иначе говоря, точку четырехмерного континуума, физически определяются простым путем, подробно описанным в первой части настоящей работы. Для перехода от одной галилеевой системы к другой, движущейся равномерно относительно первой, применимы уравнения преобразования Лоренца. Последние служат основной для вывода следствий специальной теории относитель-

ности и представляют собой не что иное, как выражение универсальной применимости закона распространения света для всех галилеевых систем отсчета.

Минковский нашел, что преобразования Лоренца удовлетворяют следующим простым условиям. Рассмотрим два соседних события, взаимное положение которых в четырехмерном континууме по отношению к галилеевому телу отсчета K определяется разностями dx, dy, dz пространственных координат и разностью dt времени. По отношению ко второй галилеевой системе отсчета мы будем предполагать, что соответствующие разности для этих двух событий есть dx', dy', dz', dt' . Тогда для этих величин всегда выполняется следующее условие¹:

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2 dt'^2.$$

Из этого условия следует справедливость преобразования Лоренца. Это можно выразить следующим образом. Величина

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2,$$

которая относится к двум соседним точкам четырехмерного пространственно-временного континуума, имеет одно и то же значение для всех выбранных (галилеевых) тел отсчета. Если мы заменим $x, y, z, \sqrt{-1} ct$ соответственно на x_1, x_2, x_3, x_4 , то в результате получим, что выражение

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

не зависит от выбора тела отсчета. Величину ds мы называем «расстоянием» между двумя событиями или точками четырехмерного континуума.

Итак, если мы выбрали в качестве временной переменной минимальную величину $\sqrt{-1} ct$ вместо вещественной величины t , мы можем рассматривать пространственно-временной континуум — согласно специальной теории относительности — как «эвклидов» четырехмерный континуум; этот результат следует из последнего параграфа.

§ 27. Пространственно-временной континуум общей теории относительности не является эвклидовым

В первой части этой работы мы имели возможность пользоваться пространственно-временными координатами, которые допускали непосредственную простую физическую интерпретацию

¹ См. Приложение I и II. Выведенные там соотношения (11а) и (12) для самих координат справедливы также для разностей координат, а следовательно, и для дифференциалов координат (бесконечно малых разностей).

и которые могли, согласно § 26, рассматриваться как четырехмерные декартовы координаты. Эта возможность следовала из закона постоянства скорости света. Но, согласно § 21, в общей теории относительности этот закон уже не справедлив. Наоборот, мы пришли к выводу, что, согласно последней, скорость света всегда должна зависеть от координат, если присутствует гравитационное поле. В связи со специальным примером в § 23 мы нашли, что гравитационное поле делает невозможным то определение координат и времени, которое привело нас к цели в специальной теории относительности.

Из этих соображений мы приходим к убеждению, что, согласно общему принципу относительности, пространственно-временной континуум не может рассматриваться как эвклидов и что здесь мы встречаемся с общим случаем, с которым мы познакомились на примере двумерного континуума неравномерно нагретой доски стола. Так же как в указанном примере было невозможно построить декартову систему координат из одинаковых линеек, здесь невозможно построить из твердых тел и часов такую систему (тело отсчета), чтобы линейки и часы, закрепленные жестко по отношению друг к другу, непосредственно указывали бы положение и время. В этом состоит сущность той трудности, с которой мы встретились в § 23.

Однако соображения, изложенные в § 25 и 26, указывают нам путь преодоления этой трудности. Отнесем четырехмерный пространственно-временной континуум произвольным образом к гауссовым координатам. Припишем каждой точке континуума (событию) четыре числа x_1, x_2, x_3, x_4 (координаты), которые не имеют никакого непосредственного физического смысла, но служат лишь для определенной, хотя и произвольной нумерации точек континуума. При этом нумерация вовсе не должна быть такой, чтобы x_1, x_2, x_3 рассматривались обязательно как «пространственные» координаты, а x_4 — как «временная» координата.

Читатель может подумать, что подобное описание мира было бы совершенно неадекватным; какой смысл в том, что я приписываю некоторому событию определенные координаты x_1, x_2, x_3, x_4 , если сами эти координаты лишены смысла? Однако более внимательное рассмотрение показывает, что это беспокойство неосновательно. Рассмотрим, например, любую движущуюся материальную точку. Если бы эта точка существовала лишь мгновение, а не продолжительное время, то она описывалась бы в пространстве-времени единственной системой значений x_1, x_2, x_3, x_4 . Длительное же существование материальной точки характеризуется бесконечно большим числом таких систем значений, которые примыкают друг к другу, образуя континуум. Таким образом, материальной точке соответствует (одномерная) линия в четырехмерном континууме. Другим движущимся материальным точкам соответствует столько же линий нашего континуума. Только

те из утверждений относительно этих точек могут претендовать на физическую реальность, которые касаются встреч этих точек. В нашей математической формулировке такая встреча описывается тем, что обе линии, представляющие соответствующие движения рассматриваемых материальных точек, имеют одну определенную общую систему значений координат x_1, x_2, x_3, x_4 . После тщательного размышления читатель, несомненно, согласится с тем, что единственное реальное утверждение пространственно-временного характера, которое содержится в наших физических высказываниях, относится только к таким встречам.

Описывая движение материальной точки относительно некоторого тела отсчета, мы констатировали лишь встречи этой точки с определенными точками тела отсчета. Соответствующие значения времени мы можем также определить путем констатации встреч тела с часами, вместе с констатацией встреч стрелок часов с определенными точками циферблатов. После некоторого размышления мы видим, что точно так же обстоит дело с пространственными измерениями с помощью масштабов.

Вообще, всякое физическое описание сводится к некоторому числу констатаций, каждое из которых относится к пространственно-временному совпадению двух событий A и B . В гауссовых координатах всякая такая констатация выражается через совпадения четырех координат x_1, x_2, x_3, x_4 этих событий. Таким образом, в действительности описание пространственно-временного континуума в гауссовых координатах вполне заменяет описание с помощью тела отсчета, не страдая при этом недостатками последнего метода описания; оно не связано с эвклидовым характером описываемого континуума.

§ 28. Точная формулировка общего принципа относительности

Теперь мы в состоянии заменить предварительную формулировку общего принципа относительности, данную в § 18, более точной. Первоначально мы формулировали общий принцип следующим образом: «Все тела отсчета K, K' и т. д. эквивалентны для описания природы (формулировки общих законов природы), каково бы ни было состояние движения этих тел отсчета». Эта формулировка не может быть сохранена, поскольку невозможно пользоваться твердыми телами отсчета в том смысле, в каком это делалось в специальной теории относительности, при пространственно-временном описании. Место тела отсчета занимает гауссова система координат. Основной идее общего принципа относительности соответствует следующее утверждение: «Все гауссовы системы координат в принципе эквивалентны для формулирования общих законов природы».

Этот общий принцип относительности можно выразить еще и в другой форме, из которой еще отчетливее видно, что он является естественным обобщением специального принципа относительности. Согласно специальной теории относительности, уравнения, которые выражают общие законы природы, сохраняют свою форму, если вместо пространственно-временных переменных относительно x, y, z, t (галилеева) тела отсчета K ввести с помощью преобразования Лоренца переменные x', y', z', t' относительно нового тела отсчета K' . Согласно же общей теории относительности, эти уравнения при любом преобразовании гауссовых переменных x_1, x_2, x_3, x_4 должны переходить в уравнения того же вида, поскольку всякое преобразование (не только преобразование Лоренца) отвечает переходу от одной гауссовой системы координат к другой.

Тот, кто не желает отказываться от обычного трехмерного представления, может охарактеризовать развитие основной идеи общей теории относительности следующим образом: специальная теория относительности относится к галилеевым областям, т. е. к таким, в которых не существует гравитационного поля. При этом телом отсчета служит галилеево тело отсчета, т. е. твердое тело, находящееся в таком состоянии движения, что для него выполняется галилеев закон равномерного и прямолинейного движения «изолированных» материальных точек.

Некоторые соображения позволяют распространять те же галилеевы области и на негалилеевы тела отсчета. Тогда относительно последних существует гравитационное поле специального вида (см. § 20 и 23).

Но в полях тяготения не существует твердых тел с эвклидовыми свойствами; поэтому понятие твердого тела отсчета неприменимо в общей теории относительности. Гравитационные поля влияют и на ход часов, так что физическое определение времени непосредственно с помощью часов совершенно не обладает той степенью очевидности, какой оно обладает в специальной теории относительности.

Поэтому используются нежесткие тела отсчета, которые могут не только двигаться произвольным образом, как целое, но и претерпевать изменения форм при своем движении. Для определения времени служат часы со сколь угодно нерегулярным ходом. Мы должны представить себе, что эти часы помещены в какой-либо точке нежесткого тела отсчета; они удовлетворяют лишь одному условию, которое заключается в том, что одновременно воспринимаемые показания часов, находящихся в соседних пространственных точках, различаются бесконечно мало. Это деформируемое тело отсчета, которое не без основания можно назвать «моллюском отсчета», по существу равноценно любой четырехмерной гауссовой системе координат. По сравнению с гауссовой системой «моллюск» имеет известную наглядность благодаря фор-

мальному сохранению (собственно говоря, без основания) самостоятельного существования пространственных координат по отношению к временной координате. Каждая точка «моллюска» рассматривается как пространственная точка, и каждая покоящаяся относительно моллюска материальная точка считается просто покоящейся, пока сам моллюск рассматривается как тело отсчета. Общий принцип относительности требует, чтобы все эти моллюски могли быть использованы в качестве тел отсчета с одинаковым успехом при формулировании общих законов природы; эти законы совершенно не должны зависеть от выбора моллюска. Именно в далеко идущих ограничениях, которые налагаются на законы природы, и лежит истинная сила общего принципа относительности.

§ 29. Решение проблемы гравитации на основе общего принципа относительности

Если читатель внимательно следил за всеми предыдущими рассуждениями, то он без труда поймет и методы, ведущие к решению проблемы гравитации.

Мы исходим из рассмотрения галилеевой области, т. е. области, в которой не существует поле тяготения относительно галилеева тела отсчета K . Поведение масштабов и часов, так же как и поведение «изолированных» материальных точек, относительно K известно из специальной теории относительности; последние движутся прямолинейно и равномерно.

Теперь отнесем эту область к любой системе гауссовых координат или к «моллюску» как телу отсчета K' . Тогда по отношению к K' существует гравитационное поле G (особого вида). Поведение измерительных линеек, часов, а также свободно движущихся материальных точек относительно K' мы изучаем просто путем математических расчетов. Это поведение мы интерпретируем как поведение измерительных линеек, часов и материальных точек под влиянием гравитационного поля G . Затем мы вводим следующую гипотезу: гравитационное поле воздействует на измерительные линейки, часы и свободно движущиеся материальные точки согласно тем же законам и в том случае, когда существующее гравитационное поле не может быть выведено путем простого преобразования координат из галилеева специального случая.

Следующим шагом является исследование пространственно-временного поведения гравитационного поля G , которое было выведено из галилеева специального случая только путем преобразования координат. Это поведение формулируется в виде закона, который справедлив всегда, независимо от выбора тела отсчета («моллюска»).

Этот закон еще не является общим законом гравитационного поля, поскольку изученное поле представляет собой поле специального вида. Для нахождения общего закона гравитационного поля необходимо обобщить полученный закон, что и может быть сделано без какого-либо произвола при учете следующих требований:

а) искомое обобщение должно также удовлетворять общему принципу относительности;

б) если в рассматриваемой области имеется материя, то создаваемое ею гравитационное поле определяется только ее инертной массой и, следовательно, согласно § 15, только ее энергией;

в) гравитационное поле и материя вместе должны удовлетворять закону сохранения энергии (и импульса).

Наконец, общий принцип относительности дает возможность выяснить влияние гравитационного поля на все те процессы, законы которых в отсутствие поля известны, т. е. уже включены в рамки специальной теории относительности. При этом пользуются в принципе тем же методом, который был изложен выше применительно к масштабам, часам и свободно движущимся материальным точкам.

Выведенная таким образом из общего принципа относительности теория гравитации не только отличается своим изяществом, не только устраняет присущие классической механике недостатки, отмеченные в § 21, не только интерпретирует эмпирический закон равенства инертной и тяжелой масс. Она также объяснила уже два существенно различных результата астрономических наблюдений, которые не могла объяснить классическая механика. Мы уже упоминали о втором из этих результатов, а именно об искривлении световых лучей в поле тяготения Солнца; первый же касается орбиты планеты Меркурия.

Если уравнения общей теории относительности применить к случаю, когда гравитационные поля можно считать слабыми и когда все массы движутся относительно системы координат со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света, то как первое приближение получается прежде всего теория Ньютона. Последняя получается здесь без особых предположений, тогда как Ньютон вынужден был ввести в качестве гипотезы силу притяжения, обратно пропорциональную квадрату расстояния между двумя взаимодействующими материальными точками. При повышении точности вычислений выявляются отклонения от теории Ньютона, которые, правда, настолько незначительны, что почти все ускользают от наблюдения.

Одно из этих отклонений мы должны здесь рассмотреть специально. Согласно теории Ньютона, планета движется вокруг Солнца по эллипсу, который вечно сохраняет свое положение относительно неподвижных звезд, если можно было бы отвлечься от воздействия других планет на рассматриваемую планету и от

собственного движения «неподвижных» звезд. После введения поправок в наблюдаемое движение планет на оба эти эффекта орбита планеты по отношению к неподвижным звездам должна представлять собой неизменный эллипс, если теория Ньютона верна в точности. Для всех планет, за исключением ближайшей к Солнцу планеты Меркурий, был подтвержден этот вывод теории, который может быть проверен с высокой точностью, какая только достижима при современных методах наблюдения. Со времен Леверье о планете Меркурий известно, что эллипс ее орбиты с учетом указанных выше поправок не остается в неизменном положении относительно неподвижных звезд, но вращается, хотя и чрезвычайно медленно, в плоскости орбиты и в направлении орбитального движения планеты. Это вращение эллипса орбиты составляет 43 угловых секунды в столетие, причем это значение установлено с точностью до нескольких секунд. В классической механике это явление удастся объяснить лишь ценой введения маловероятных гипотез, придуманных только для данного случая.

Согласно общей теории относительности получается, что эллипс орбиты каждой планеты должен вращаться вокруг Солнца вышеуказанным образом и что это вращение для всех планет, кроме Меркурия, слишком мало, чтобы его можно было заметить при современной точности наблюдений; для Меркурия же вращение должно составлять именно 43 угловых секунды в столетие, в точном согласии с наблюдаемым.

Кроме этого, из теории до сих пор можно было вывести еще два следствия, доступные проверке наблюдением: искривление световых лучей гравитационным полем Солнца¹ и смещение спектральных линий света, посылаемого к нам большими звездами, по сравнению со спектральными линиями света, испускаемого теми же самыми атомами на Земле. Я не сомневаюсь в том, что и это последнее следствие теории скоро найдет свое подтверждение.

О МИРЕ КАК ЦЕЛОМ

§ 30. Космологические затруднения теории Ньютона

Кроме изложенного в § 21 затруднения, классическая небесная механика встречается со вторым принципиальным затруднением, которое, насколько мне известно, было впервые подробно рассмотрено астрономом Зеелигером. Если подумать над вопросом, как следует представлять себе мир в целом, то прежде всего напрашивается следующий ответ. Мир бесконечен в пространстве (и времени). Всюду существуют звезды, так что хотя

¹ Впервые наблюдалось А. Эддингтоном и другими в 1919 г. (см. Приложение III).

плотность материи в отдельных случаях весьма различна, в среднем она всюду одинакова. Иными словами: как бы далеко ни проникать в мировое пространство, всюду мы найдем рассеянные скопления неподвижных звезд примерно одного типа и одинаковой плотности.

Это представление несовместимо с теорией Ньютона. Больше того, последняя требует, чтобы мир имел нечто вроде центра, где плотность числа звезд была бы максимальной и чтобы эта плотность убывала с расстоянием от центра так, что на бесконечности мир был бы совсем пустым. Звездный мир должен представлять собой конечный остров в бесконечном океане пространства¹.

Это представление не очень удовлетворительно само по себе. Оно неудовлетворительно еще и потому, что приводит к следствию, что свет, излучаемый звездами, а также отдельные звезды звездной системы должны непрерывно удаляться в бесконечность, никогда не возвращаясь и не вступая во взаимодействие с другими объектами природы. Такой мир, материя которого сконцентрирована в конечном пространстве, должен был бы медленно, но систематически опустошаться.

Чтобы избежать этих следствий, Зеелигер изменил закон Ньютона, предположив, что притяжение двух масс на больших расстояниях убывает быстрее, чем по закону $1/r^2$. Тогда плотность может оставаться постоянной всюду в бесконечной Вселенной, не приводя к бесконечно большим полям тяготения. Так можно освободиться от неприятного представления о том, что материальный мир обладает каким-то центром. Правда, это освобождение от описанных выше принципиальных трудностей достигается ценой изменения и усложнения закона Ньютона, которые не имеют ни экспериментального, ни теоретического обоснования. Можно указать сколько угодно законов, приводящих к тому же результату, причем нет оснований предпочесть один другому; каждый из этих законов, как и закон Ньютона, не обоснован общими теоретическими принципами.

§ 31. Возможность конечного и все же неограниченного мира

Предположения о структуре Вселенной развивались еще и в совершенно ином направлении. А именно: развитие неевклидовой геометрии привело к осознанию того факта, что можно сомневаться в бесконечности нашего пространства, не всту-

¹ Обоснование. Согласно теории Ньютона, на некоторой массе m оканчивается определенное число «силовых линий», которые приходят из бесконечности, причем это число пропорционально массе m . Если плотность ρ_0 массы в мире в среднем постоянна, то в шаре объемом V заключается в среднем масса $\rho_0 V$. Таким образом, число силовых линий, входящих внутрь шара через его поверхность F , пропорционально величине $\rho_0 V$. Че-

ная в противоречие с законами мышления и с опытом (Риман, Гельмгольц). Эти соображения уже детально выяснены с исключительной отчетливостью Гельмгольцем и Пуанкаре; здесь же я могу лишь кратко коснуться этого вопроса.

Сначала представим себе некоторое двумерное пространство. Пусть в плоскости свободно передвигаются плоские существа с плоскими инструментами, в частности с плоскими жесткими масштабами. Для них ничего не существует вне этой плоскости, тогда как все происходящее в их плоскости и наблюдаемое ими самими или при помощи их плоских инструментов является каузально замкнутым. В частности, для них осуществимы построения плоской евклидовой геометрии с помощью линеек, например рассмотренное в § 24 построение сетки. Мир этих существ, в отличие от нашего, является пространственно-двумерным, но, как и наш мир, простирается в бесконечность. В их мире умещается бесконечно много одинаковых квадратов, построенных из линеек, т. е. объем (поверхность) этого двумерного мира бесконечен. Утверждение существ этого мира, что их мир является «плоским», имеет тот смысл, что при помощи имеющихся у них линеек можно выполнить построения из квадратов в плоской евклидовой геометрии, причем каждая линейка, независимо от своего положения, всегда представляет один и тот же отрезок.

Теперь снова представим себе двумерное существо, но не на плоскости, а на сферической поверхности. Плоские существа со своими масштабами и другими предметами лежат точно на этой поверхности и не могут покинуть ее; весь воспринимаемый ими мир простирается исключительно на сферическую поверхность. Могут ли эти существа рассматривать геометрию своего мира как двумерную геометрию Евклида и при этом рассматривать свои линейки как осуществление понятия «расстояния»? Они не могут поступить так, поскольку при попытке провести прямую они получат кривую, которую мы, трехмерные существа, называем дугой большого круга, т. е. замкнутую линию определенной конечной длины, которую можно измерить с помощью линейки. Площадь поверхности этого мира также конечна и ее можно сравнить с площадью одного из квадратов, построенного из линеек. Прелесть такого рассуждения заключается в том, что мы увидели мир этих существ конечным и все же не имеющим границ.

Но существам, обитающим на поверхности шара, не требуется совершать кругосветное путешествие, чтобы заметить неевклидовость мира, в котором они живут. Они могут убедиться на всяком участке своего мира, если этот участок не слишком мал. Они

рез единичку поверхности шара проходят силовые линии, число которых пропорционально величине $\rho_0(V/F)$, или $\rho_0 R$. Следовательно, напряженность поля на поверхности возрастала бы до бесконечности с увеличением радиуса шара R , что невозможно.

проводят из некоторой точки во всех направлениях «прямые отрезки» (дуги окружностей, с точки зрения трехмерного пространства) одинаковой длины. Линию, соединяющую свободные концы этих линий, они будут называть «окружностью». Согласно евклидовой геометрии на плоскости, отношение длины окружности, измеренной некоторой линейкой, к длине диаметра, измеренной той же линейкой, равно постоянной величине π , не зависящей от диаметра окружности. Наши плоские существа на своей сферической поверхности нашли бы для этого отношения следующую величину:

$$\pi = \frac{\sin(r/R)}{(r/R)},$$

т. е. величину, меньшую π , причем отличающуюся от π тем значительнее, чем больше радиус окружности по сравнению с радиусом R этого мира (сферы). Из этого соотношения существа, обитающие на сфере, могут определить радиус R своего мира, если даже их измерениям доступна лишь сравнительно небольшая часть их мира-сферы. Но если эта часть слишком мала, то они уже не в состоянии установить: находятся ли они на сферической поверхности или на евклидовой плоскости; небольшой участок сферической поверхности очень мало отличается от участка части плоскости такой же величины.

Таким образом, если сферически-поверхностные существа обитают на планете, солнечная система которой составляет лишь ничтожно малую часть сферического мира, то они не могли бы решить, живут ли они в конечном или бесконечном мире, поскольку часть мира, доступная их опыту, в обоих случаях является практически плоской, т. е. евклидовой. Непосредственно видно, что для обитающих на сфере существ длина окружности сначала возрастает с радиусом до «окружности мира» и затем, при дальнейшем возрастании радиуса, постепенно уменьшается до нуля. При этом площадь круга постоянно возрастает, пока она наконец не станет равной полной площади всего сферического мира.

Читатель, быть может, удивится тому, что мы поместили наши существа именно на сферу, а не на какую-либо иную замкнутую поверхность. Но это имеет свое оправдание, поскольку сфера отличается от всех других замкнутых поверхностей тем свойством, что все ее точки равноценны. Отношение длины окружности к своему радиусу r хотя и зависит от r , но при данном r оно одинаково для всех точек сферического мира; иными словами: этот мир-сфера есть «поверхность постоянной кривизны».

Имеется трехмерный аналог двумерного сферического мира, а именно, трехмерное сферическое пространство, открытое Риманом. Все его точки также равноценны. Оно обладает конечным объемом, который определяется его «радиусом» R и равен $2\pi^2 R^3$. Можно ли представить себе сферическое пространство? Предста-

вить себе какое-либо пространство означает не что иное, как представить себе сущность «пространственных» опытов, т. е. опытов, которые можно производить при движении «твердых» тел. В этом смысле сферическое пространство можно себе представить.

Пусть из некоторой точки проведены прямые (или натянуты шнуры) во всех направлениях и на каждой из них отложена при помощи масштаба длина r . Все свободные концы этих отрезков лежат на сфере. Эту поверхность F мы можем измерить масштабным квадратом. Для евклидова мира $F = 4\pi r^2$; если же мир сферический, то F всегда меньше $4\pi r^2$. С возрастанием r площадь поверхности F растет от нуля до некоторого максимума, определяемого «радиусом мира», а при дальнейшем возрастании r величина F снова постепенно уменьшается до нуля. Выходящие из начальной точки радиальные прямые сначала все более удаляются друг от друга, а затем снова сближаются и в конце концов вновь сходятся в точке, «противолежащей» начальной точке; таким образом, они промеряют все сферическое пространство. Легко убедиться, что трехмерное сферическое пространство вполне аналогично двумерному (поверхности сферы). Оно конечно (т. е. имеет конечный объем), но не имеет границ.

Заметим, что существует еще одна разновидность сферического пространства, а именно, «эллиптическое пространство». Его можно представить себе как сферическое пространство, в котором «противолежащие точки» совпадают. Таким образом, эллиптический мир можно рассматривать до некоторой степени как центрально-симметричный сферический мир.

Из сказанного следует, что мыслимы замкнутые пространства, не имеющие границ. Среди них выделяется своей простотой сферическое (и соответственно, эллиптическое) пространство, все точки которого равноценны. Отсюда перед астрономами и физиками возникает чрезвычайно интересный вопрос: является ли мир, в котором мы живем, бесконечным или же он, подобно сферическому миру, конечен? Наш опыт далеко не достаточен для ответа на этот вопрос. Однако общая теория относительности дает возможность ответить на этот вопрос со значительной достоверностью; при этом разрешается также затруднение, изложенное в § 30.

§ 32. Структура пространства, согласно общей теории относительности¹

Согласно общей теории относительности, геометрические свойства пространства не самостоятельны: они обусловлены материей. Отсюда можно сделать какое-либо заключение о геометрической структуре мира, лишь положив в основу рассмотрение

¹ См. Приложение IV (стр. 234). — Прим. ред.

предположения о том, что состояние материи является известным. Из опыта известно, что, при соответствующем выборе системы координат, скорости звезд малы по сравнению со скоростью распространения света. Поэтому мы можем в грубом приближении выяснить свойства мира в целом, считая материю покоящейся.

Из предшествующих рассуждений мы уже знаем, что поля тяготения, т. е. распределение материи, влияют на поведение часов и масштабов. Отсюда уже ясно, что не может быть и речи о точной применимости евклидовой геометрии в нашем мире. Однако мыслимо, что наш мир мало отклоняется от евклидова; это предположение допустимо, поскольку, согласно расчету, даже массы порядка массы нашего Солнца лишь совершенно незначительно влияют на метрику окружающего нас пространства. Можно представить себе, что наш мир по своим геометрическим свойствам подобен поверхности, неравномерно искривленной в некоторых частях, нигде, однако, не отклоняющейся значительно от плоскости, и похож на поверхность слабо волнующегося моря. Такого рода мир можно назвать квазиэвклидовым. Он был бы пространственно-бесконечным. Однако вычисления показывают, что в квазиэвклидовом мире средняя плотность материи должна равняться нулю. Следовательно, такой мир не может всюду быть заполнен материей; он приводит к той неудовлетворительной картине, которую мы набросали в § 30.

Но если средняя плотность материи в мире даже очень мало отличается от нуля, то мир не может быть квазиэвклидовым. Больше того, вычисления показывают, что при равномерно распределенной материи мир с необходимостью должен быть сферическим (или эллиптическим). Так как в действительности в отдельных областях материя распределена неравномерно, то реальный мир в отдельных частях будет отклоняться от сферического; он будет квазисферическим. Однако он должен быть конечным. Теория дает простое соотношение¹ между пространственной протяженностью мира и средней плотностью материи в нем.

Приложение I

ПРОСТОЙ ВЫВОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА

(Дополнение к § 11)

При расположении систем координат, изображенном на рис. 2, оси X обеих систем постоянно совпадают. Мы можем здесь разделить задачу на две части и сначала рассматривать лишь события, локализованные на оси X . Такое событие опре-

¹ А именно, для «радиуса мира» R получается соотношение $R^2 = \frac{2}{\rho}$.

При этом в системе СГС $2/\rho = 1,08 \cdot 10^{27}$, а ρ — средняя плотность материи.

деляется относительно системы координат K абсциссой x и временем t , а относительно K' абсциссой x' и временем t' . Требуется найти x' и t' , если даны x и t .

Световой сигнал, распространяющийся в положительном направлении оси X , движется в соответствии с уравнением

$$x = ct,$$

или

$$x - ct = 0. \quad (1)$$

Так как этот же световой сигнал распространяется и относительно K' с той же скоростью c , то его движение относительно системы K' будет описываться уравнением

$$x' - ct' = 0. \quad (2)$$

Пространственно-временные точки (события), удовлетворяющие уравнению (1), должны удовлетворять также уравнению (2). Это, очевидно, будет иметь место в том случае, если вообще выполняется соотношение

$$x' - ct' = \lambda(x - ct), \quad (3)$$

где λ — некоторая постоянная. В самом деле, согласно соотношению (3), обращение в нуль выражения $x - ct$ означает обращение в нуль и $x' - ct'$.

Совершенно аналогичное рассуждение, примененное к световым лучам, распространяющимся в отрицательном направлении оси X , приводит к условию

$$x' + ct' = \mu(x + ct). \quad (4)$$

Складывая и вычитая соотношения (3) и (4) и при этом вводя для удобства вместо постоянных λ и μ новые постоянные

$$a = \frac{\lambda + \mu}{2},$$

$$b = \frac{\lambda - \mu}{2},$$

получаем

$$\begin{aligned} x' &= ax + bct, \\ ct' &= act - bx. \end{aligned} \quad (5)$$

Наша задача была бы решена, если бы были известны постоянные a и b ; последние определяются из следующих соображений.

Для начала координат системы K' все время $x' = 0$, следовательно, согласно первому уравнению (5), имеем

$$x = \frac{bc}{a} t.$$

Обозначая через v скорость, с которой начало координат систе-

мы K' движется относительно K , находим

$$v = \frac{bc}{a}. \quad (6)$$

То же самое значение v получается из уравнений (5), если вычислять скорость какой-либо другой точки системы K' относительно K или скорость некоторой точки системы (направленную в сторону отрицательных значений x) относительно K' . Итак, величину v кратко можно назвать относительной скоростью обеих систем.

Далее, из принципа относительности ясно, что с точки зрения системы K длина некоторого единичного масштаба, покоящегося относительно K' , должна быть точно такой же, как и длина такого же масштаба, покоящегося относительно K , с точки зрения K' . Чтобы знать, как ведут себя точки оси X' с точки зрения системы K , нам надо лишь сделать «моментальный снимок» системы K' из системы K ; это значит, что вместо t (время системы K) мы должны подставить некоторое определенное значение его, например $t = 0$. Тогда из первого уравнения (5) получим

$$x' = ax.$$

Следовательно, две точки оси X' , расстояние между которыми при измерении в системе K' равно 1 ($\Delta x' = 1$), на нашей моментальной фотографии находятся на расстоянии

$$\Delta x = \frac{1}{a}. \quad (7)$$

Но если моментальный снимок делается из системы K' ($t' = 0$), то, исключая t из уравнений (5) при помощи равенства (6), получаем

$$x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) x.$$

Отсюда заключаем, что две точки на оси X , находящиеся на расстоянии, равном единице (относительно K), на нашей моментальной фотографии разделены расстоянием

$$\Delta x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (7a)$$

Так как, согласно сказанному выше, обе моментальные фотографии должны быть идентичны, то Δx в соотношении (7) должно быть равно $\Delta x'$ в соотношении (7a), так что получаем

$$a^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (7b)$$

Равенства (6) и (7b) определяют постоянные a и b . Подставляя выражения для a и b в уравнения (5), получаем первое и

четвертое уравнения, приведенные в § 11:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c} \frac{x}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Итак, мы получили преобразование Лоренца для событий на оси X . Они удовлетворяют условию

$$x'^2 - c^2 t'^2 = x^2 - c^2 t^2. \quad (8a)$$

Распространение этого результата на события, происходящие вне оси X , достигается сохранением уравнений (8) и добавлением уравнений

$$\left. \begin{aligned} y' &= y, \\ z' &= z. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

При этом постулат постоянства скорости света в пустоте остается в силе для световых лучей любого направления, как для системы K , так и для системы K' . Это можно показать следующим образом.

Пусть в момент времени $t = 0$ из начала координат системы K посылается световой сигнал. Он будет распространяться согласно уравнению

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct,$$

или, после возведения этого уравнения в квадрат,

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0. \quad (10)$$

Закон распространения света в соединении с постулатом относительности требует, чтобы упомянутый сигнал — при наблюдении из системы K' — распространялся согласно формуле

$$r' = ct',$$

или

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0. \quad (10a)$$

Чтобы уравнение (10a) было следствием уравнения (10), должно выполняться соотношение

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = \gamma (x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2). \quad (11)$$

Так как для точек на оси X должно выполняться уравнение (8a), то $\gamma = 1$. Легко убедиться, что преобразование действительно удовлетворяет соотношению (11) при $\gamma = 1$; именно, соотношение (11) является следствием соотношения (8a) и уравнений (9), а следовательно, и уравнений (8) и (9). Тем самым преобразование Лоренца выведено.

Преобразование Лоренца, выраженное уравнениями (8) и (9), еще должно быть обобщено. Очевидно несущественно, что координатные оси системы K были выбраны пространственно параллельными осям системы K' . Несущественно также, что скорость равномерного и прямолинейного движения системы K' относительно K имела направление оси X . Из простого рассуждения следует, что в этом общем случае преобразование Лоренца можно составить из двух преобразований, а именно: из преобразований Лоренца для частного случая и из чисто пространственных преобразований, которые соответствуют переходу от одной прямоугольной системы координат к другой, с иным направлением осей.

Обобщенное преобразование Лоренца характеризуется математически таким образом.

Оно выражает переменные x', y', z', t' как такие однородные линейные функции переменных x, y, z, t , что тождественно выполняется соотношение

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2. \quad (11a)$$

Это означает: если в левую часть последнего равенства вместо x', y', z', t' подставить их выражения через x, y, z, t , то левая часть равенства (11a) совпадает с правой.

Приложение II

ЧЕТЫРЕХМЕРНЫЙ МИР МИНКОВСКОГО

(Дополнение к § 17)

Обобщенное преобразование Лоренца может быть охарактеризовано еще проще, если вместо t как переменной времени ввести мнимую величину $\sqrt{-1} ct$. Если в соответствии с этим положить

$$x_1 = x,$$

$$x_2 = y,$$

$$x_3 = z,$$

$$x_4 = \sqrt{-1} ct$$

и аналогично для системы K' , то условие, которому преобразование тождественно удовлетворяет, будет иметь вид

$$x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 + x_4'^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2. \quad (12)$$

Именно в это соотношение переходит соотношение (11a) при указанном выборе «координат».

Из соотношения (12) видно, что мнимая временная координата x_4 и пространственные координаты x_1, x_2, x_3 входят в него симметрично. На этом основании, согласно теории относительности, «время» x_4 входит в выражение законов природы в такой же форме, что и пространственные координаты x_1, x_2, x_3 .

Четырехмерный континуум, описываемый «координатами» x_1, x_2, x_3, x_4 , Минковский назвал «миром», а событие в данной точке — «мировой точкой». Из изучающей «происходящее» в трехмерном пространстве физика становится в известном смысле изучающей «существующее» в четырехмерном «мире».

Этот четырехмерный «мир» имеет глубокое сходство с трехмерным «пространством» (евклидовой) аналитической геометрии. Именно, если в последней ввести новую декартову систему координат (x'_1, x'_2, x'_3) с тем же началом x'_1, x'_2, x'_3 , то будут однородными линейными функциями x_1, x_2, x_3 , которые тождественно удовлетворяют соотношению

$$x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2.$$

Аналогия с соотношением (12) полная. Мир Минковского формально можно рассматривать как четырехмерное евклидово пространство (с мнимой временной координатой); преобразование Лоренца соответствует «вращению» системы координат в четырехмерном «мире».

Приложение III¹

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

С точки зрения теории познания эволюцию опытной науки можно представить себе как непрерывный процесс индукции. Теории развиваются и выражаются как объединения большого числа отдельных опытных фактов в форме эмпирических законов, из которых путем сравнения устанавливаются общие законы. С этой точки зрения развитие науки имеет сходство с составлением каталогов и является чисто эмпирическим делом.

Но эта точка зрения никоим образом не охватывает весь действительный процесс. Она умалчивает о важной роли интуиции и дедуктивного мышления в развитии точной науки. Как только какая-нибудь наука выходит из начальной стадии своего развития, прогресс теории достигается уже не просто в процессе упорядочения. Исследователь, отталкиваясь от опытных фактов, ста-

¹ Перевод приложений III и IV выполнен по 14-му английскому изданию настоящей работы. — Прим. ред.

рается развивать систему понятий, которая, вообще говоря, логически опиралась бы на небольшое число основных предположений, так называемых аксиом. Такую систему понятий мы называем теорией. Теория черпает свое подтверждение в том, что она связывает большое число отдельных эмпирических фактов и в этом состоит ее «справедливость».

Для одного и того же комплекса опытных фактов может существовать несколько теорий, значительно различающихся друг от друга. Но в отношении выводов из теорий, которые доступны для опытной проверки, согласие между теориями может быть настолько полным, что трудно найти такие следствия, в которых эти теории отличаются друг от друга. Случай, представляющий общий интерес, имеется, например, в области биологии — в дарвиновской теории развития видов путем естественного отбора в процессе борьбы за существование и в теории эволюции, основывающейся на гипотезе наследственности приобретенных свойств.

Другой случай далеко идущего совпадения следствий двух теорий встречается в механике Ньютона, с одной стороны, и в общей теории относительности — с другой. Это совпадение идет настолько далеко, что до настоящего времени мы смогли найти лишь немного допускающих опытную проверку следствий общей теории относительности, к которым не приводила дорелятивистская физика; и это несмотря на глубокое различие основных предпосылок обеих теорий. Здесь мы еще раз рассмотрим эти важные следствия, а также обсудим относящиеся к ним опытные данные, которые получены.

а. Движение перигелия планеты Меркурий

Согласно ньютоновой механики и ньютонову закону тяготения, некоторая планета, вращающаяся вокруг Солнца, должна описывать эллипс вокруг последнего, точнее, вокруг общего центра тяжести Солнца и планеты. При этом Солнце, или общий центр тяжести, находится в одном из фокусов эллиптической орбиты, так что в течение планетного года расстояние между Солнцем и планетой растет от минимума к максимуму и затем снова уменьшается до минимума. Если вместо закона Ньютона мы примем несколько иной закон притяжения, то найдем, что и при этом новом законе движение по-прежнему будет происходить так, что расстояние между Солнцем и планетой будет испытывать периодические колебания; но в этом случае угол, описываемый линией, соединяющей Солнце и планету, за время такого периода (от перигелия — ближайшего положения к Солнцу — до перигелия), отличался бы от угла 360°. Траектория не была бы тогда замкнутой, но заполняла бы с течением времени

кольцеобразную область в плоскости орбиты, т. е. между окружностями с радиусами, равными наименьшему и наибольшему расстояниям планеты от Солнца.

Согласно общей теории относительности, которая, конечно, отличается от теории Ньютона, должно также иметь место небольшое отклонение от движения планеты по орбите в соответствии с законами Кеплера — Ньютона, так что угол, описываемый радиусом, соединяющим Солнце и планету, от одного перигелия до другого, должен превосходить угол, соответствующий полному обороту, на величину, определяемую выражением

$$+ \frac{24\pi^2 a^2}{T^2 c^2 (1 - e^2)}.$$

(Один полный оборот соответствует углу 2π в абсолютной угловой мере, как это обычно принято в физике). Здесь a — большая полуось эллипса, e — его эксцентриситет, c — скорость света, T — период обращения планеты. Этот результат можно представить также и в следующем виде: согласно общей теории относительности, большая ось эллипса вращается вокруг Солнца в направлении вращения планеты. Согласно теории, это вращение должно составлять для планеты Меркурий 43 угловых секунды в столетие, а у других планет нашей солнечной системы оно должно быть настолько незначительным, что недоступно наблюдению¹.

В самом деле, астрономы нашли, что теория Ньютона недостаточна для того, чтобы рассчитать наблюдаемое движение Меркурия с точностью, которая может быть достигнута при наблюдениях в настоящее время. После того как были приняты в расчет все возмущающие влияния остальных планет на движение Меркурия, было найдено (Леверье, 1895; Ньюкомб, 1895), что остается необъясненным движение перигелия орбиты Меркурия, скорость которого не отличается заметно от упомянутых выше $+43$ угловых секунд в столетие. Ошибка этого эмпирического результата составляет лишь несколько секунд.

6. Отклонение луча света гравитационным полем

В § 22 уже было упомянуто, что, согласно общей теории относительности, луч света, проходя через гравитационное поле, должен искривляться подобно тому, как искривляется траектория тела, движущегося в гравитационном поле. Согласно этой теории, можно ожидать, что луч света, проходящий мимо какого-

¹ Особенно, если учесть, что орбита следующей планеты, Венеры, представляет собой почти точный круг, а это затрудняет точное определение положения перигелия.

либо небесного тела, должен отклониться в направлении последнего. Для луча света, проходящего мимо Солнца на расстоянии Δ радиусов Солнца от его центра, угол отклонения α будет составлять

$$\alpha = \frac{1,7 \text{ секунды}}{\Delta}.$$

Можно добавить, что половина этого отклонения вызывается, согласно этой теории, ньютоновским полем тяготения Солнца, а другая половина — геометрическим искажением («искривлением») пространства, обусловленным Солнцем.

Этот результат допускает экспериментальную проверку путем фотографирования звезд во время полного солнечного затмения. Единственной причиной, почему мы должны выбирать такой момент, является то, что во всякое другое время земная атмосфера, освещенная Солнцем, светит настолько сильно, что делает невидимыми звезды, расположенные вблизи диска Солнца. Предсказываемый эффект можно ясно видеть из рис. 5. Если бы Солнца (S) не было, то практически бесконечно удаленную звезду при наблюдении с Земли мы увидели бы в направлении D_1 . Но вследствие отклонения Солнцем луча света от звезды мы будем видеть звезду в направлении D_2 , т. е. на несколько большем расстоянии от центра диска Солнца, чем ее реальное положение.

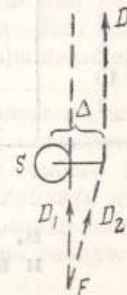


Рис. 5.

На практике это проверяется следующим образом. Звезды, находящиеся вблизи Солнца, фотографируются во время солнечного затмения. Затем делается вторая фотография тех же звезд, когда Солнце находится в другой части неба, т. е. на несколько месяцев раньше или позже. При сравнении фотографий, сделанной во время солнечного затмения, с этой контрольной фотографией положения звезд должны оказаться смещенными в радиальном направлении (от центра солнечного диска) на величину, соответствующую углу α .

Исследованием этого важного вывода мы обязаны Королевскому обществу и Королевскому астрономическому обществу. Несмотря на войну и вызванные ею трудности материального и психологического характера, эти общества снарядили две экспедиции — в Собраль (Бразилия) и на о. Принсипи (у побережья Западной Африки) — и послали нескольких знаменитых английских астрономов (Эддингтона, Коттингэма, Кроммеллина и Дэвидсона) для фотографирования солнечного затмения 29 мая 1919 г. Ожидавшиеся относительные смещения положений звезд на снимках солнечного затмения по сравнению с контрольными снимками достигали лишь нескольких сотых долей миллиметра. Таким образом, при фотографировании и в последующих измерениях была необходима высокая точность.

Результаты измерений весьма удовлетворительно подтвердили теорию. Прямоугольные составляющие наблюдавшихся и вычисленных отклонений звезд (в угловых секундах) приведены в таблице.

Номер звезд	Первая координата		Вторая координата	
	наблюдаемое значение	вычисленное значение	наблюдаемое значение	вычисленное значение
11	-0,19	-0,22	+0,16	+0,02
5	+0,29	+0,31	-0,46	-0,43
4	+0,11	+0,10	+0,83	+0,74
3	+0,20	+0,12	+1,00	+0,87
6	+0,10	+0,04	+0,57	+0,40
10	-0,03	+0,09	+0,35	+0,32
2	+0,95	+0,85	-0,27	-0,09

в. Смещение спектральных линий в красном конце спектра

В § 23 было показано, что в системе K' , вращающейся относительно галилеевой системы K , скорость хода покоящихся относительно K' часов одинаковой конструкции зависит от их места. Исследуем теперь эту зависимость количественно. Часы, находящиеся на расстоянии r от центра диска, имеют относительно системы K скорость

$$v = \omega r,$$

где ω — угловая скорость вращения диска K' относительно K .

Если v_0 есть число колебаний маятника часов в единицу времени («скорость» хода часов) относительно K в случае, когда часы неподвижны, то «скорость» хода v часов, движущихся относительно K со скоростью v , но покоящихся относительно диска, в соответствии с § 12 будет равна

$$v = v_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

или, с достаточной точностью,

$$v = v_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right).$$

Это соотношение может быть записано также в форме

$$v = v_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\omega^2 r^2}{c^2}\right).$$

Обозначим через Φ разность потенциалов центробежной силы между местом расположения часов и центром диска, т. е. взятую со знаком минус работу, которую необходимо совершить против центробежной силы для перемещения единицы массы из места расположения часов на вращающемся диске в центре диска. Тогда будем иметь

$$\Phi = -\frac{\omega^2 r^2}{2}.$$

Отсюда следует, что

$$v = v_0 \left(1 - \frac{\Phi}{c^2}\right).$$

Из этой формулы прежде всего видно, что двое часов одинаковой конструкции идут с различной «скоростью», если они расположены на различных расстояниях от центра диска. Этот вывод справедлив также с точки зрения наблюдателя, вращающегося вместе с диском.

Теперь, с точки зрения наблюдателя на диске, часы на диске находятся в гравитационном поле с потенциалом Φ ; следовательно, полученный результат будет справедлив и для любого гравитационного поля. Больше того, мы можем рассматривать атом, который испускает излучение, соответствующее определенным спектральным линиям, как часы, так что справедливо следующее утверждение.

Атом поглощает или испускает свет, частота которого зависит от потенциала гравитационного поля, в котором находится атом.

Частота излучения атома, находящегося на поверхности небесного тела, будет несколько меньше частоты излучения атома такого же элемента, находящегося в свободном пространстве (или атома на поверхности меньшего небесного тела). Так как $\Phi = -K \frac{M}{r}$, где K — ньютоновская постоянная тяготения, M — масса небесного тела и r — его радиус, то должно происходить смещение спектральных линий излучения атомов, находящихся на поверхности звезд, к красному концу спектра, по сравнению со спектральными линиями атомов того же элемента, находящихся на земной поверхности. При этом величина этого смещения будет равна

$$\frac{v_0 - v}{v_0} = \frac{KM}{c^2 r}.$$

Для Солнца ожидаемое смещение спектральных линий к красному концу спектра составляет около двух миллионных длины волны. Надежный расчет смещения для неподвижных звезд невозможен, поскольку ни масса M , ни радиус r , вообще говоря, не известны.

Вопрос о том, существует ли этот эффект, остается открытым; и в настоящее время астрономы с большим упорством работают над его решением. Вследствие того, что этот эффект в случае

Солнца весьма мал, трудно судить о его существовании. В то время как Греббе и Бахем (Бони), на основе своих собственных измерений и измерений Эвершеда и Шварцшильда для полос диафрагмы, считают существование этого эффекта почти не вызывающим сомнений, другие исследователи, в частности С. Джон, приходят на основании своих измерений к противоположному выводу.

Средние смещения спектральных линий в сторону длинноволновой части спектра определенно обнаружены при статистических исследованиях неподвижных звезд; но до настоящего времени состоящие обработки имеющегося материала не позволяли прийти к определенному выводу о том, можно ли эти смещения действительно объяснить влиянием тяготения. Результаты наблюдений собраны вместе и подробно обсуждаются с точки зрения рассматриваемого здесь вопроса в работе Э. Фройндлиха «К проверке общей теории относительности»¹.

Во всяком случае, в ближайшие годы будет получено определенное решение проблемы. Если смещение спектральных линий к красному концу спектра под действием гравитационного поля не существует, то общая теория относительности несостоятельна. С другой стороны, если будет определенно установлена связь смещения спектральных линий с гравитационным потенциалом, то изучение этого смещения может дать нам важную информацию о массах небесных тел².

Приложение IV

СТРУКТУРА ПРОСТРАНСТВА СОГЛАСНО ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

(Дополнение к § 32)

Со времени публикации первого издания этой работы наши знания о структуре пространства в больших областях («космологическая проблема») получили важное развитие, о котором необходимо упомянуть даже в популярном изложении данного вопроса.

Раньше мы рассуждали, основываясь на следующих двух предположениях.

¹ Naturwissenschaften, 1919, № 35, S. 520.

² Гравитационное красное смещение впервые наблюдалось в 1924 г. Адамсом в спектре спутника Сириуса — белого карлика Сириус-B; при этом величина смещения оказалась эквивалентной доплеровскому смещению при скорости удаления источника около 20 км/сек. Наблюдаемое красное смещение спектральных линий в поле Солнца соответствует 0,6 км/сек. В 1960 г. Паунд и Ребка с помощью эффекта Мессбауэра впервые наблюдали красное смещение спектральных линий в гравитационном поле Земли. Это смещение у поверхности Земли при разности высот 21 м составляет $7,5 \cdot 10^{-5}$ см/сек. — Прим. ред.

1. Существует некоторая средняя плотность материи во всем пространстве, которая всюду одна и та же и отлична от нуля.

2. Размеры («радиус») пространства не зависят от времени.

Оба эти предположения могут быть согласованы с общей теорией относительности лишь после добавления в уравнения поля гипотетического члена, который не следует из теории и не представляется естественным с теоретической точки зрения («космологический член в уравнениях гравитационного поля»).

В то время предположение (2) представлялось мне неизбежным, поскольку я считал, что в случае отказа от него открываются безграничные возможности для всевозможных спекуляций.

Однако уже в двадцатых годах русский математик Фридман показал, что с чисто теоретической точки зрения более естественным является иное предположение. Он показал, что, опуская предположение (2), можно сохранить предположение (1), не вводя довольно неестественный космологический член в уравнения гравитационного поля. Именно, первоначальные уравнения поля допускают решение, в котором «радиус мира» зависит от времени (расширяющееся пространство). В этом смысле, согласно Фридману, можно сказать, что теория требует расширения пространства.

Несколькими годами позже Хэббл в специальных исследованиях внегалактических туманностей показал, что спектральные линии обнаруживают красное смещение, которое непрерывно возрастает с увеличением расстояния до туманности. В соответствии с нашими современными знаниями это можно интерпретировать только в смысле принципа Доплера как всестороннее расширение системы звезд, требуемое, согласно Фридману, уравнениями гравитационного поля. Поэтому открытие Хэббла можно рассматривать до некоторой степени как подтверждение теории.

Однако возникает странная трудность. Интерпретация галактического смещения спектральных линий, открытого Хэбблом, как расширения (в котором трудно сомневаться с теоретической точки зрения) приводит к заключению, что существовало начало расширения «всего лишь» 10⁹ лет назад, тогда как, по данным физической астрономии, развитие отдельных звезд и звездных систем продолжалось значительно большее время. Пока неизвестно, как преодолеть это противоречие.

Далее, я хотел бы заметить, что теория расширяющейся Вселенной вместе с наблюдательными данными астрономии не позволяет решить вопрос о том, является (трехмерное) пространство конечным или бесконечным, в то время как первоначальная модель «статической» Вселенной приводила к замкнутому (конечному) пространству.

ДИАЛОГ ПО ПОВОДУ ВОЗРАЖЕНИЙ ПРОТИВ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Критик. Уже не раз в различных журналах высказывались сомнения по поводу теории относительности, но релятивисты отвечали на них весьма редко¹. Не будем уточнять, высокомерие ли, слабость или лень лежат в основе этого упущения; возможно даже, что здесь действует смесь этих психологических моментов; возможно также, что критические замечания нередко делают очевидной слишком малую компетентность критика. Об этом, повторяю, не стоит говорить. Но сегодня я зашел к тебе для того, чтобы ты не мог уклониться, как обычно. Уверю тебя, что я не отступлюсь, пока ты не ответишь мне на все вопросы.

Однако чтобы ты не очень пугался, а даже получил некоторое удовольствие от нашей беседы, я скажу тебе и нечто утешительное. В отличие от некоторых моих коллег, я не столь высоко мню о себе, чтобы выступать как сверхразумное существо, обладающее нечеловеческой проницательностью и уверенностью (подобно газетному рецензенту научной литературы или даже театральному критику). Я говорю как простой смертный, сознавая, что критик нередко испытывает недостаток в собственных мыслях.

Не хочу я также, как это недавно сделал один мой коллега, пизвергая гром и молнию, подобно прокурору, обвинять тебя в краже духовных ценностей и иных бесчестных действиях. Мои возражения вызваны лишь необходимостью выяснить некоторые вопросы, мнения по которым сильно расходятся. Во всяком случае, я прошу тебя разрешить мне опубликовать нашу беседу, зная, что заботы о том, как достать бумагу, — не единственные заботы,

¹ Под «релятивистом» здесь следует понимать сторонника физической теории относительности, а не философа-релятивиста.

которые не дают спать моему другу, редактору Беролинензису¹.

Будучи заранее уверенным в твоём согласии, перехожу немедленно к сути дела. С тех пор как была создана специальная теория относительности, ее вывод о замедляющем влиянии движения



Рис. 1

на ход часов вызывал возражения и, как мне кажется, весьма основательные. В самом деле, этот вывод обязательно приводит к противоречию с основами теории. Чтобы лучше понимать друг друга, приведем его вначале с достаточной четкостью.

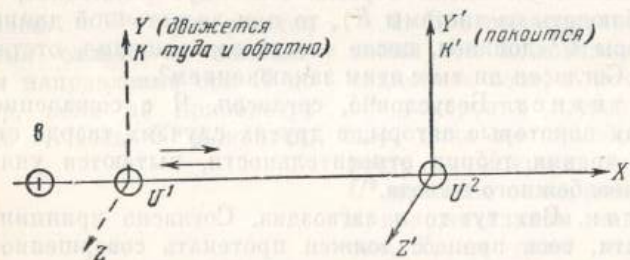


Рис. 2

Пусть K — галилеева система координат в смысле специальной теории относительности; это означает, что есть тело, по отношению к которому изолированные материальные точки движутся прямолинейно и равномерно. Пусть далее U^1 и U^2 — двое совершенно одинаковых часов, не испытывающих никаких влияний извне. Они будут идти с одинаковой скоростью, если их сверить в непосредственной близости друг около друга или на любом расстоянии друг от друга, при условии, что они покоятся относительно K . Но если одни из часов, например U^2 , движутся по отношению к системе K равномерно и прямолинейно, то, согласно

¹ Вероятно, шутливо искаженная фамилия издателя «Naturwissenschaften» А. Берлинера. — Прим. ред.

специальной теории относительности, они с точки зрения системы K должны двигаться медленнее, чем установленные неподвижные по отношению к K часы U^1 . Этот вывод уже сам по себе является странным. Он тем более вызывает серьезные сомнения, когда представляешь себе следующие, хорошо известные мысленные эксперименты.

Пусть A и B — две удаленные друг от друга точки системы K . Чтобы определить положения, примем точку A за начало координат системы K . Пусть B — некоторая точка на положительной оси X . Будем считать, что сначала и те и другие часы покоятся в точке A . Там они идут одинаково быстро; пусть положения их стрелок будут одинаковы. Сообщим теперь часам U^2 некоторую постоянную скорость в положительном направлении оси X , чтобы они двигались к точке B . Представим себе, что в точке B скорость меняется на обратную, так что часы U^2 опять начнут двигаться к точке A . Когда часы достигнут точки A , их затормозят, так что по отношению к K они опять будут покоиться. Так как наблюдаемое из K изменение положения стрелок часов U^2 , которое возможно при перемене направления скорости U^2 , не может превзойти некоторой величины и так как часы U^2 во время равномерного движения вдоль отрезка AB идут медленнее, чем U^1 (если наблюдать из системы K), то при достаточной длине отрезка AB часы U^2 должны, после своего возвращения, отставать от часов U^1 . Согласен ли ты с этим заключением?

Релятивист. Безусловно, согласен. Я с сожалением наблюдал, как некоторые авторы, в других случаях твердо стоявшие на точке зрения теории относительности, пытаются уклониться от этого неизбежного вывода.

Критик. Вот тут-то и загвоздка. Согласно принципу относительности, весь процесс должен протекать совершенно одинаково, если его представить в системе координат K' , которая движется вместе с часами U^2 . По отношению к системе K' движутся взад и вперед часы U^1 , тогда как часы U^2 все время остаются в покое. Но отсюда следует, что по окончании движения часы U^1 должны отставать от часов U^2 , в противоположность сделанному выше выводу. Даже самые рьяные приверженцы теории не станут утверждать, что из двух покоящихся и расположенных друг возле друга часов каждый отстает друг от друга.

Релятивист. Твое последнее утверждение безусловно верно, однако метод вывода несправедлив, потому что, согласно специальной теории относительности, системы координат K и K' никоим образом не являются равноправными. В самом деле, эта теория утверждает равноценность только всех галилеевых (неускоренных) систем координат, т. е. таких систем координат, по отношению к которым в достаточной мере изолированные материальные точки движутся прямолинейно и равномерно. Такой системой координат является, конечно, система K , но не ускоря-

мая время от времени система K' . Поэтому нельзя выдвинуть никаких возражений против основ теории относительности, исходя из того результата, что часы U^2 после передвижения туда и обратно отстают от часов U^1 .

Критик. Признаюсь, что ты начисто отверг мое возражение, но должен сказать, что чувствую себя скорее изобличенным, чем убежденным твоими аргументами. Впрочем, мое возражение остается в силе, если встать на точку зрения общей теории относительности. В этом случае системы координат могут двигаться произвольно; следовательно, рассмотренный процесс может быть отнесен к системе координат K' , постоянно связанной с часами U^2 , точно так же, как и к системе координат K .

Релятивист. Несомненно справедливо, что с точки зрения общей теории относительности мы можем в равной мере пользоваться как системой K' , так и системой K . Однако легко заметить, что по отношению к рассматриваемому процессу системы K и K' никоим образом не равноценны. Этот процесс в системе K выглядит совершенно иначе (см. рис. 1), чем в том случае, если рассматривать его в системе K' (рис. 2), как показывает следующее сопоставление.

1. Часы U^2 ускоряются внешними силами в положительном направлении оси X до тех пор, пока не приобретут скорость v . Часы U^1 покоятся.

2. Часы U^2 движутся с постоянной скоростью v до точки B на положительной оси X . Часы U^1 покоятся.

3. Часы U^2 ускоряются внешними силами, действующими в отрицательном направлении оси X до тех пор, пока не приобретут скорость v в отрицательном направлении оси X .

1. В отрицательном направлении оси X возникает гравитационное поле, в котором часы U^1 ускоренно падают до тех пор, пока не приобретут скорость v . Удерживающие часы U^2 внешние силы, действующие в положительном направлении оси X , не дают этим часам прийти в движение в гравитационном поле. Когда часы U^1 приобретают скорость v , гравитационное поле исчезает.

2. Часы U^1 движутся с постоянной скоростью v до точки B' на отрицательной оси X . Часы U^2 покоятся.

3. Появляется однородное поле тяжести, направленное по положительной оси X , под действием которого часы U^1 ускоряются в положительном направлении оси X до тех пор, пока не достигнут скорости v в этом направлении; затем поле тяжести исчезает. Удерживаю-

щие часы U^2 внешние силы, действующие в отрицательном направлении оси X , предотвращают при этом движение часов U^2 в появляющемся поле тяжести.

4. Часы U^2 движутся с постоянной скоростью v назад, в отрицательном направлении оси X до тех пор, пока не приблизятся к часам U^1 . Часы U^1 остаются в покое.

5. Часы U^2 останавливаются внешними силами.

4. Часы U^1 движутся с постоянной скоростью v в положительном направлении оси X до тех пор, пока не приблизятся к часам U^2 . Часы U^2 остаются в покое.

5. Возникает поле тяжести, направленное по отрицательной оси X , которое останавливает часы U^1 . После этого поле тяжести снова исчезает. Часы U^1 при этом удерживаются внешними силами в состоянии покоя.

Нужно, конечно, иметь в виду, что в левом и правом столбцах описан один и тот же процесс, только описание слева относится к координатной системе K , а описание справа — к координатной системе K' . Согласно обоим описаниям, часы U^2 в конце описываемого процесса отстанут в результате от часов U^1 на определенную величину. Если относить все к координатной системе K' , то это явление объясняется следующим образом: в течение второго и четвертого этапов рассматриваемого процесса часы U^1 , движущиеся со скоростью v , идут медленнее покоящихся часов U^2 . Но это отставание будет с избытком компенсировано быстрым ходом часов U^1 во время третьего этапа процесса, а именно: согласно общей теории относительности, часы идут быстрее, чем больше гравитационный потенциал в том месте, где они находятся, и часы U^1 во время третьего этапа процесса действительно находятся в области большего гравитационного потенциала, чем часы U^2 . Расчет показывает, что это опережение в два раза больше отставания во втором и четвертом этапах процесса. Это рассуждение полностью объясняет приведенный тобой парадокс.

Критик. Ты, я вижу, искусно выбрался из западни, но я солгу, если скажу, что полностью удовлетворен. Камень преткновения не убран с дороги, а лишь передвинут на другое место. Твои соображения показали мне связь между приведенными мной возражениями и другими трудностями, также уже не раз выдвигавшимися. Ты разрешил парадокс, используя влияние на часы действующего в системе K' гравитационного поля. Но разве не является это гравитационное поле чем-то чисто фиктивным? Ведь



А. Майкельсон, А. Эйнштейн и Р. Милликен

его существование вызвано только выбором системы координат. Истинные же гравитационные поля всегда создаются массами и не могут быть устранены подходящим выбором системы координат. Как же можно поверить, что некоторое, явно фиктивное поле оказывает влияние на ход часов?

Релятивист. На это я прежде всего должен заметить, что различать реальное и нереальное для нас не имеет смысла. По отношению к системе K' гравитационное поле «существует» в том же самом смысле, как и всякая другая физическая величина, которая может быть определена в некоторой системе координат, несмотря на то, что ее не существует в системе K . Здесь нет ничего странного, и это легко доказать следующим примером, заимствованным из классической механики. Никто не сомневается в «реальности» кинетической энергии, так как иначе пришлось бы отрицать энергию вообще. Однако ясно, что кинетическая энергия тел зависит от состояния движения координатной системы: подходящим выбором последней можно, очевидно, сделать так, что в некоторый определенный момент кинетическая энергия поступательного движения одного тела примет наперед

заданное положительное значение или нулевое значение. В специальном случае, при одинаково направленных и равных по величине скоростях всех масс, можно подходящим выбором координатной системы сделать общую кинетическую энергию равной нулю. Аналогия, на мой взгляд, полная.

Вместо того чтобы различать реальное и нереальное, мы четко различаем величины, принадлежащие физической системе (независимо от выбора координатной системы), и величины, которые зависят от координатной системы. Далее, следовало бы потребовать, чтобы физика вводила в свои законы лишь величины первого рода. На деле же выяснилось, что этот путь практически нереален, как ясно показало развитие классической механики. Можно было бы, например, подумать, да так, собственно, и попытались сделать, о введении в законы классической механики вместо координат лишь расстояний материальных точек друг от друга; можно было бы априори ожидать, что таким путем проще всего достичь той цели, которую поставила теория относительности. Но развитие науки не подтвердило этой догадки. Обойтись без координатной системы оказалось невозможно, и необходимо было использовать значения координат, которые не свободны от определения измерения. Более того, в общей теории относительности четыре координаты пространственно-временного континуума являются совершенно произвольно выбранными параметрами, каждый из которых имеет самостоятельный физический смысл. Частично этот произвол переносится и на те величины (компоненты поля), с помощью которых описывается физическая реальность. Только некоторые, в общем довольно сложные выражения, образованные из компонент поля и координат, соответствуют величинам, измеряемым независимо от координатной системы (т. е. реальным величинам). Так, например, компонентам гравитационного поля в некоторой пространственно-временной точке вовсе не соответствует величина, независимая от выбора координат. Таким образом, «физическая реальность» соответствует вовсе не гравитационному полю, *взятому самому по себе*, но только этому же полю вместе с другими данными. Поэтому нельзя сказать ни того, что гравитационное поле само по себе есть нечто «реальное», ни того, что оно «чисто фиктивно».

В том обстоятельстве, что в общей теории относительности связь между *входящими в уравнения и измеряемыми* величинами гораздо менее непосредственна, чем в обычных теориях, лежит, вероятно, основная трудность, появляющаяся при изучении общей теории относительности. Твое последнее возражение является следствием того, что ты забываешь об этом обстоятельстве.

Ты счел фиктивным использованное в примере с часами поле еще и потому, что силовые линии *истинного* гравитационного поля обязательно должны порождаться массами, а в рассматриваемом примере нет никаких масс, которые могли бы породить

это поле. Возразить на это можно двояко. С одной стороны, априори не является обязательным требованием, чтобы свойственный теории Ньютона взгляд, согласно которому любое гравитационное поле нужно рассматривать как порождаемое массами, был перенесен неизменным в общую теорию относительности. Этот вопрос опять тесно связан с упомянутым выше обстоятельством, что значение компонент поля определено не столь непосредственно, как в теории Ньютона. Но, с другой стороны, нельзя утверждать, что не существует масс, которым можно было бы приписать возникновение поля. Конечно, ускоренные координатные системы не могут рассматриваться как реальные источники поля, хотя это мнение и приписывал мне один остроумный критик. Однако все существующие во Вселенной звезды следует считать участвующими в создании гравитационного поля, поскольку в процессе ускорения координатной системы K' они ускоряются по отношению к последней и могут индуцировать гравитационное поле подобно тому, как ускоренно движущиеся электрические заряды индуцируют электрическое поле. Приближенное интегрирование уравнений гравитационного поля показало, что подобного рода индуктивное действие со стороны ускоренно движущейся массы действительно должно проявляться. Из этих соображений очевидно, что полная ясность по выдвинутому тобой вопросу может быть достигнута лишь путем создания такого представления о геометрическо-механическом строении Вселенной, которое совпадало бы с теорией. Я пытался проделать это в прошлом году и пришел, как мне кажется, к удовлетворительному результату, но разбор его завел бы нас слишком далеко.

Критик. В самом деле, после твоего изложения мне кажется, что из парадокса с часами нельзя вывести внутренней противоречивости теории относительности. Возможно даже, как мне кажется, что теория эта вообще не имеет внутренних противоречий, но отсюда еще не следует, что ее нужно серьезно принимать во внимание. *Я не понимаю, почему ради абстрактного преимущества, а именно, ради идеи относительности, нужно все так усложнять и вносить такие вычислительные трудности.* А их значительность ты сам достаточно ясно показал в последнем ответе. Да станет ли кто-нибудь пользоваться теорией относительности, например, для того, чтобы рассмотреть движение небесных тел солнечной системы в геоцентрической системе координат, которая к тому же принимает участие во вращательном движении Земли? Действительно ли можно рассматривать эту координатную систему, относительно которой неподвижные звезды вращаются с громадными скоростями «покоящейся» и равноправной? Не грешит ли такой подход против здравого смысла и принципа экономии мышления? Не могу не повторить здесь меткого замечания Лейнарда по затронутой теме. После того как он обсудил теорию относительности, представив для наглядности «движущуюся»

координатную систему идущим железнодорожным поездом, он заметил: «Предположим теперь, что воображаемый железнодорожный поезд совершает явно неравномерное движение. Если при этом под влиянием сил инерции все в поезде превратилось в обломки, в то время как все снаружи осталось в целости, то, полагая я, *здоровый смысл* придет к выводу, что это поезд, а не окружающая его среда, внезапно изменил свое движение. Обобщенный принцип относительности, в его простейшем понимании, требует, чтобы мы и в этом случае допустили, что изменила свою скорость окружающая среда и что катастрофа в поезде является лишь следствием этого толчка внешнего мира, переданного посредством «гравитационного действия» из внешнего мира внутрь поезда. При этом возникают вопросы: почему колокольня возле поезда не обрушилась, хотя она испытала толчок вместе с окружением, почему следствие толчка проявляется *так односторонне* лишь в поезде, тогда как нельзя сделать вывода о месте, где произошло изменение движения, но принцип относительности не дает на них ни одного удовлетворительного для простого разума ответа».

Релятивист. По многим причинам мы охотно миримся с трудностями, к которым нас приводит теория. Во-первых, всякий последовательно мыслящий человек будет удовлетворен тем, что понятие абсолютного движения, которому нельзя приписать никакого кинетического смысла, не должно использоваться в физике; нельзя отрицать, что основы физики выигрывают в логичности, избавляясь от этого понятия. Далее, факт тождественности инертной и тяжелой массы настойчиво требует разъяснения, не говоря уже о том, что физика нуждается в методе, который бы позволял осуществить идею близкого действия в применении к гравитации. Без действительного ограничительного принципа физика едва ли может заниматься этой проблемой, так как можно предложить *очень много теорий*, удовлетворяющих довольно ограниченными знаниями в этой области. Embarras de richesse¹ — одна из злейших врагов, отравляющий существование физикам. Постулат относительности настолько ограничивает возможности, что он заранее определил путь, по которому *должна* идти теория. Наконец, должно быть объяснено вековое движение перигелия планеты Меркурий, существование которого окончательно установлено астрономами, но не может быть удовлетворительно объяснено теорией Ньютона.

Утверждение *принципиальной эквивалентности* координатных систем не означает, что каждая координатная система в равной мере *удобна* для исследования заданной физической системы, точно так же, как в классической механике. Строго говоря, нельзя,

¹ «Embarras de richesse» или «embarras de choix» — французское выражение: «Больше альтернатив, чем можно справиться»; буквально: «затруднение от избытка». — *Прим. ред.*

например, утверждать, что Земля движется по эллипсу вокруг Солнца, так как подобное высказывание предполагает координатную систему, в которой Солнце покоится, в то время как классическая механика допускает также и системы, по отношению к которым Солнце *движется* прямолинейно и равномерно. Однако мало вероятно, что кому-либо придет в голову для исследования движения Земли использовать одну из координатных систем последнего рода; столь же мало вероятно, что, анализируя эту задачу, он придет к выводу, что координатная система, начало координат которой все время находится в центре тяжести, принципиально предпочтительнее рассматриваемой системы. То же имеет место и в твоём примере. Для изучения солнечной системы никто не станет использовать координатную систему, покоящуюся относительно Земли, поскольку это непрактично. *В принципе же* такая система, согласно общей теории относительности, совершенно равноправна со всеми другими. Тот факт, что неподвижные звезды будут двигаться с громадными скоростями, если в основу исследования положить такую систему координат, равно как и сложная структура существующего в этой системе гравитационного поля, имеющего, например, соответствующие центробежным силам компоненты, представляет собой возражение не против *допустимости*, а только против целесообразности такого выбора координат. Так же обстоит дело и с примером господина Ленарда. Исходя из теории относительно, нельзя понимать этот случай в том смысле, что «*возможно*, окружение (поезда) изменило свою скорость». Дело идет не о двух исключающих друг друга гипотезах о месте, в котором происходит движение, а скорее о двух принципиально равноценных способах описания положения вещей¹. Вопрос о том, какое описание выбрать, может решаться лишь исходя из целесообразности, но не из принципиальных соображений. Следующий встречный пример показывает, как мало сулит нам в подобных вещах так называемый «здоровый смысл», призванный в качестве третьей стороны. Сам Ленард говорит, что до сих пор против *специальной* теории относительности (т. е. принципа относительности для равномерно и прямолинейно движущихся координатных систем) не было выдвинуто ни одного действительного возражения. Движущийся с постоянной скоростью поезд можно считать с тем же правом «покоящимся», как рельсы вместе с окружающей местностью — «равномерно движущимися». Допускает ли это «здоровый смысл» машиниста? Он будет возражать,

¹ Тот факт, что колокольня не обрушилась, объясняется во втором способе описания тем, что она вместе со всеми телами и Землей *свободно падала* в гравитационном поле (во все время движения), в то время как поезд удерживался от свободного падения внешними силами (силами торможения). Свободно падающее тело ведет себя относительно внутренних изменений как изолированное от всех внешних воздействий свободно движущееся тело.

что непрерывно топят и смазывает не окрестности, а паровоз и что соответственно в движении этого последнего проявляются результаты его работы.

Критик. После нашей беседы я должен признать, что опровергнуть положения теории относительности не так просто, как мне казалось раньше. Правда, у меня есть еще кое-какие возражения, но не хочу надоедать тебе до тех пор, пока не продумаю до конца наш разговор. Прежде чем расстаться, задам еще один вопрос, не относящийся к возражениям; я задаю его из чистого любопытства. Как обстоит дело с «нашим бедным больным» из теоретической физики, с эфиром, который многие из вас окончательно объявили умершим?

Релятивист. У него изменчивая судьба, и нельзя сказать окончательно, что он уже мертв. До Лоренца он существовал как все пронизывающая жидкость, газоподобная жидкость, и в других формах, разных в зависимости от автора. Лоренц сделал его неподвижным, олицетворяющим «покоящуюся» систему координат, т. е. предпочтительное состояние движения во Вселенной. Согласно специальной теории относительности, больше не существует предпочтительных состояний движения; это означает отрицание эфира в смысле предыдущих теорий. В самом деле, если бы эфир все-таки существовал, то он должен был бы находиться в каждой пространственно-временной точке в определенном состоянии движения, которое должно было бы сказываться в оптических явлениях. Никакого предпочтительного состояния движения нет, как учит специальная теория относительности, поэтому нет никакого эфира в старом смысле. Общая теория относительности также не знает предпочтительного состояния движения в точке, которое можно было бы интерпретировать как скорость эфира. Однако в то время как в специальной теории относительности область пространства без материи и без электрического поля представляется совершенно пустой, т. е. ее нельзя охарактеризовать никакими физическими величинами, в общей теории относительности даже пустое в этом смысле пространство имеет физические свойства. Последние характеризуются математическими компонентами гравитационного потенциала, которые определяют как гравитационное поле, так и метрические свойства этой области пространства. Это положение можно очень удобно понимать в том смысле, что речь идет о некотором эфире, состояние которого непрерывно изменяется от точки к точке. Нужно только остерегаться приписывать этому «эфиру» материальные свойства (например, определенную скорость в каждой точке).

ЧТО ТАКОЕ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Я с радостью согласился с предложением написать для «Таймс» что-нибудь о теории относительности. После печального периода, когда разорвалось активное общение между учеными, я охотно воспользовался возможностью выразить мое чувство радости и благодарности английским астрономам и физикам. С великими и гордыми традициями науки в вашей стране полностью согласуется то, что выдающиеся ученые должны были отдать много времени и сил и ваши научные учреждения не останавливались перед большими затратами, чтобы проверить смысл теории, которая была усовершенствована и опубликована во время войны в стране ваших врагов. Хотя исследование влияния гравитационного поля Солнца на лучи света является совершенно объективным делом, я не могу удержаться от того, чтобы не выразить мою личную благодарность моим английским коллегам за их работу; без них мне трудно было бы увидеть подтверждение наиболее важного вывода моей теории.

В физике различают несколько типов теорий. Большинство из них являются конструктивными, т. е. их задачей является построение картины сложных явлений на основе некоторых относительно простых предположений. Так, кинетическая теория газов ставит перед собой цель свести к движениям молекул механические, тепловые и диффузионные свойства газов. Когда мы говорим, что понимаем какую-либо группу явлений природы, то это означает, что мы построили конструктивную теорию, охватывающую эту группу явлений.

Помимо этого важнейшего класса теорий существуют другие теории, которые будем называть фундаментальными. В них используется не синтетический, а аналитический метод. Исходным пунктом и основой этих теорий являются не гипотетические положения, а эмпирически найденные общие свойства явлений,

принципы, из которых следуют математически сформулированные критерии, имеющие всеобщую применимость. Термодинамика, например, исходит из эмпирического факта, что вечный двигатель невозможен, и отсюда пытается вывести аналитическим путем необходимые условия, которые удовлетворяются во всех случаях. К достоинствам конструктивных теорий относятся их законченность, гибкость и ясность; достоинством фундаментальных теорий является их логическое совершенство, надежность исходных положений.

Теория относительности принадлежит к классу фундаментальных теорий. Чтобы понять ее, нужно ознакомиться с принципами, на которых она основана. Но прежде чем излагать эти принципы, нужно указать, что теория относительности подобна дому с двумя этажами: специальной теорией относительности и общей теорией относительности.

С античных времен известно, что для описания движения тела требуется другое тело, к которому должно быть отнесено движение первого. Движение железнодорожного поезда описывается по отношению к поверхности Земли, движение планет — по отношению ко всей совокупности видимых неподвижных звезд. Тела, к которым относят движения, в физике называются системами отсчета (координатными системами). Законы механики Галилея и Ньютона, например, можно сформулировать, только используя некоторую систему отсчета.

Однако состояние движения координатной системы нельзя выбрать произвольно, если предположить выполнимость законов механики (система не должна вращаться и ускоряться). Системы координат, допускаемые в механике, называются «инерциальными системами». Состояние движения инерциальной системы, согласно механике, не определяется единственным образом природой. Наоборот, хорошо выполняется следующее утверждение: координатная система, движущаяся равномерно и прямолинейно относительно инерциальной системы, сама является инерциальной. Специальный принцип относительности представляет собой обобщение этого утверждения на все процессы природы: каждый универсальный закон природы, который выполняется по отношению к некоторой системе отсчета S , должен также выполняться в любой другой системе S' , которая движется равномерно и прямолинейно относительно S .

Другим принципом, на котором основана специальная теория относительности, является принцип постоянства скорости света в пустоте. Согласно этому принципу, свет в пустоте всегда распространяется с определенной постоянной скоростью (не зависящей от состояния движения наблюдателя и источника света). Свое убеждение в справедливости этого принципа физики черпают из успехов электродинамики Максвелла — Лоренца.

Оба упомянутые выше принципа убедительно подтверждены экспериментом, но представляются логически непримиримыми. Специальная теория относительности сумела их примирить ценой видоизменения кинематики, иначе говоря, ценой изменения физических представлений о пространстве и времени. Стало очевидным, что говорить об одновременности двух событий имеет смысл не иначе как по отношению к некоторой данной координатной системе и что масштабы, а также ход часов должны зависеть от их состояния движения по отношению к координатной системе.

Но старая физика, включая законы движения Галилея и Ньютона, не совпадает с предложенной релятивистской кинематикой. Последняя приводила к некоторым общим математическим условиям, с которыми должны были согласоваться законы природы, если потребовать выполнение двух указанных выше принципов. К ним нужно было приспособить физику. Наиболее важным результатом было введение нового закона движения для (очень быстро) движущихся материальных точек, который вскоре удалось проверить с электрически заряженными частицами. Наиболее важный результат специальной теории относительности касался инертной массы материальной системы. Оказалось, что инертная масса системы должна зависеть от содержащейся в ней энергии; это привело к представлению о том, что инертная масса является не чем иным, как скрытой энергией. Закон сохранения массы потерял свою независимость и слился с законом сохранения энергии.

Специальная теория относительности, которая явилась просто развитием электродинамики Максвелла и Лоренца, имела последствия, выходящие далеко за ее рамки. Должна ли зависимость физических законов от состояния движения системы отсчета ограничиваться только системами отсчета, движущимися относительно друг друга прямолинейно и равномерно? Какое отношение имеет природа к вводимым нами системам координат и их движению? Если для описания природы может оказаться необходимым использование систем координат, выбранных нами произвольно, то выбор систем не должен быть ничем ограничен; физические законы должны быть полностью независимы от этого выбора (общий принцип относительности).

Установление этого общего принципа относительности было облегчено тем давно известным экспериментальным фактом, согласно которому вес и инерция тела зависят от одних и тех же констант (равенство инертной и тяжелой масс). Представим себе систему координат, которая равномерно вращается по отношению к инерциальной (в ньютоновском смысле) системе. Центробежные силы, которые проявляются относительно этой системы, должны быть, по Ньютону, приписаны инерции. Но эти центробежные силы, подобно гравитационным, пропорциональны массам тел.

Нельзя ли в таком случае рассматривать нашу систему координат как покоящуюся и центробежные силы как гравитационные? Такая точка зрения кажется очевидной, но классическая механика не допускает ее.

Это беглое рассмотрение наводит на мысль, что общая теория относительности должна давать законы тяготения, и действительное развитие этой идеи оправдало наши надежды.

Однако путь оказался труднее, чем можно было предполагать сначала, поскольку потребовалось отказаться от евклидовой геометрии. Иными словами, законы расположения материальных тел в пространстве не совпадают в точности с законами пространства, предписываемыми твердым телам евклидовой геометрией. Именно эта ситуация имеется в виду, когда мы говорим о «кривизне пространства». Тем самым теряют свой точный смысл в физике фундаментальные понятия «прямой», «плоскости» и т. д.

В общей теории относительности представления о пространстве и времени, или кинематика, перестают быть фундаментальными, независимыми ни от чего понятиями физики. Геометрические характеристики тел, их поведение и ход часов зависят прежде всего от гравитационных полей, которые в свою очередь создаются материальными телами.

Таким образом, новая теория гравитации существенно отличается в своих основных положениях от ньютоновской. Но ее практические результаты совпадают с результатами теории Ньютона столь близко, что трудно было найти хотя бы несколько случаев, в которых различие между теориями было бы доступно опытной проверке. До сих пор были предложены только следующие возможности.

1. Вращение эллиптических орбит планет около Солнца (подтверждено в случае Меркурия).

2. Искривление световых лучей под действием гравитационных полей (было подтверждено фотографиями полного затмения Солнца, сделанными английской астрономической экспедицией).

3. Смещение спектральных линий к красному концу спектра для света, приходящего от звезд, обладающих большой массой (еще не подтверждено опытом)¹.

Привлекательной стороной этой теории является ее логическая завершенность. Если какой-либо ее вывод окажется неверным, то она должна быть отброшена; какая-либо модификация ее, не нарушающая всей структуры, представляется невозможной.

Однако не следует думать, что великое творение Ньютона можно реально опровергнуть этой или какой-либо другой теорией. Его ясные и всеобъемлющие идеи навсегда сохранят свое

¹ Теперь это явление подтверждено наблюдениями (Прим. автора к англ. изд.—Ред.)

уникальное значение, как фундамента, на котором построено здание современной физики.

Замечание. Некоторые утверждения в вашей газете, касающиеся моей жизни и моей личности, обязаны своим происхождением живому воображению журналистов. Вот еще один пример относительности для развлечения читателей. Сейчас в Германии меня называют «немецким ученым», а в Англии я представлен как «швейцарский еврей». Но если бы мне было угодно судьбой стать ненавистным¹, то произошло бы обратное: я оказался бы «швейцарским евреем» для немцев и «немецким ученым» для англичан.

¹ Эйнштейн использует здесь французское выражение *bête noire*.—Прим. ред.

МОЙ ОТВЕТ ПО ПОВОДУ АНТИРЕЛЯТИВИСТСКОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

III Од претенциозным названием «Рабочее объединение немецких естествоиспытателей» собралось пестрое общество, ближайшая цель которого заключается в том, чтобы развенчать в глазах нефизиков теорию относительности, а вместе с ней и меня, как ее основателя. Недавно господ Вейланд и Герке выступили с этой целью в филармонии с первыми лекциями, на которых был и я. Я отлично понимаю, что оба оратора не заслуживают письменного ответа, ведь у меня имеются все основания считать, что в основе этой затеи лежит отнюдь не стремление к истине. (Будь я по национальности немцем со свастикой или без нее, а не евреем со свободными, интернациональными взглядами, то...). Отвечаю я только потому, что мои друзья не раз настойчиво просили меня высказать свою точку зрения.

Прежде всего замечу, что, насколько мне известно, сегодня вряд ли можно найти ученого, из тех, кто внес заметный вклад в теоретическую физику, не признающего, что теория относительности является логически вполне замкнутой и что она согласуется со всеми твердо установленными данными опыта. Наиболее выдающиеся физики-теоретики — я назову Г. А. Лоренца, М. Планка, А. Зоммерфельда, М. Лауэ, М. Борна, Лармора, А. Эдингтона, П. Дебая, П. Ланжевена, Т. Леви-Чивиту — стоят на почве теории относительности и сами активно работают над ней. Среди физиков, заслуживших международное признание, к открытым противникам теории относительности можно причислить лишь одного Ленарда. Я восхищаюсь Ленардом как искусным физиком-экспериментатором; однако в теоретической физике он еще ничего не совершил, и его возражения против общей теории относительности настолько поверхностны, что до сих пор я не считал нужным подробно отвечать на них. Придется наверстать это упущение.

Меня упрекают в том, что я занимаюсь пошлой рекламой теории относительности. Могу лишь заявить, что всю жизнь я любил хорошо обдуманые, трезвые фразы и лаконичный стиль. Высокопарные фразы и слова, будь они о теории относительности или о чем-либо другом, бросают меня в дрожь. Я часто смеялся, читая излияния, которые теперь относят на мой счет. Впрочем, я охотно предоставляю это удовольствие господам из акционерного общества.

Теперь о лекциях. Г-н Вейланд — по-видимому, совсем неспециалист (врач? инженер? политик? Мне не удалось это выяснить.) — не сообщил ничего существенного. Он разразился неуклюжими грубостями и низкими обвинениями. Второй оратор, г-н Герке, частично высказывал просто неправильные утверждения, частично пытался создать неверное впечатление у несведущих людей, односторонне отбирая и излагая материал. Это можно доказать следующими примерами.

Г-н Герке утверждает, будто теория относительности ведет к солипсизму; подобное утверждение каждый знаток сочтет за шутку. При этом он опирается на известный пример двух часов (или близнецов), из которых один проделывает замкнутый путь относительно инерциальной системы, а другой покоится. Он утверждает, хотя лучшие знатоки теории уже неоднократно опровергали это устно и письменно, будто теория ведет в этом случае к действительно бессмысленному результату: каждые из двух покоящихся рядом часов отстают относительно других. Я могу это рассматривать только как попытку намеренно ввести в заблуждение слушателей из неспециалистов.

Г-н Герке далее намекает на возражения Ленарда, многие из которых относятся к примерам механики из повседневной жизни. Они не имеют силы уже вследствие моего общего доказательства, что высказывания общей теории относительности в первом приближении совпадают с высказываниями классической механики.

Однако то, что г-н Герке сказал об экспериментальном подтверждении теории, для меня является самым убедительным доказательством, что ему не было никакого дела до выяснения истинного положения вещей.

Г-н Герке хочет заставить поверить, что движение перигелия Меркурия можно объяснить и без теории относительности. Тогда существуют две возможности. Либо изобретают особые межпланетные массы такой величины и с таким распределением, чтобы обеспечить наблюдаемую величину смещения перигелия; это, конечно, в высшей степени неудовлетворительный выход по сравнению с результатом теории относительности, объясняющей движение перигелия Меркурия без каких-либо особых предположений. Либо же обращаются к работе Гербера, который указал правильную формулу для движения перигелия Меркурия еще до меня. Однако специалисты единодушно считают, что не только

вывод Гербера абсолютно неправильный, но и что эту формулу вообще нельзя вывести из основных предположений, принятых Гербером. Поэтому работа Гербера не представляет никакой ценности и является неудачной и ошибочной теоретической попыткой. Я констатирую, что общая теория относительности дала первое истинное объяснение движения перигелия Меркурия. Я не упомянул сперва работу Гербера уже потому, что не читал ее, когда писал свою работу о движении перигелия Меркурия; однако у меня не было бы повода упоминать ее, если бы она и была мне известна. Настоящие специалисты считают непорядочными личные выпады против меня господ Герке и Ленарда, использующих подобные аргументы.

Г-н Герке в своем докладе пытался поставить под сомнение надежность мастерски выполненных английскими учеными измерений отклонения световых лучей Солнцем: из трех независимых серий снимков он упоминает лишь об одной, которая должна была привести к ошибочным результатам вследствие искажения зеркала телескопа. Он умолчал о том, что в своем официальном сообщении английские астрономы сами объявили свои результаты блестящим подтверждением общей теории относительности.

В вопросе о красном смещении спектральных линий г-н Герке умолчал о том, что выполненные до сих пор измерения противоречивы и что окончательного решения этого вопроса еще не существует. Он привел только аргументы, свидетельствующие против существования предсказанного общей теорией относительности смещения спектральных линий, но умолчал о том, что благодаря новейшим исследованиям Греббе и Бухема, а также Перо все прежние результаты лишились доказательной силы.

Наконец, замечу, что по моей инициативе в Нойгейме на собрании естествоиспытателей состоится дискуссия о теории относительности. Каждый, кто захочет, сможет высказать там свои возражения перед форумом ученых.

За границей, особенно на моих голландского и английского коллег по науке Г. А. Лоренца и А. Эддингтона, которые обстоятельно занимались теорией относительности и многократно выступали с лекциями об этой теории, произведет странное впечатление, когда они увидят, что теория и ее основатель подвергаются таким нападкам в самой Германии.

СТАРЫЕ И НОВЫЕ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Когда физики предпочитают пути, проложенные Ньютоном, то доминирует следующее представление о физической реальности: реальность — это материя; материя испытывает только такие изменения, которые мы воспринимаем, как движение в пространстве. Движение, пространство, время — это реальные формы. Любая попытка отрицать физическую реальность пространства рушится, сталкиваясь с законом инерции. Если считать ускорение реальностью, тогда и пространство должно быть реальностью, в пределах которой тела воспринимаются как ускоренно движущиеся.

Ньютон понимал это и потому назвал пространство «абсолютным». В его теоретическом построении была еще и третья составляющая независимой реальности — движущая сила, действующая между материальными частицами. Следовало считать, что такие силы зависят только от положения частиц. Эти силы, действующие между частицами, рассматривались как безусловно связанные с самими частицами; пространственное распределение сил подчинялось неизменному закону.

Физики XIX в. считали, что существуют два вида материи — весома материя и электричество. Предполагалось, что частицы весома материи взаимодействуют друг с другом посредством гравитационных сил, подчиняющихся закону Ньютона. Частицы электрической материи взаимодействуют посредством кулоновских сил, также обратно пропорциональных квадрату расстояния между частицами. Никаких определенных и общепринятых взглядов на природу сил, действующих между весомыми и электрическими частицами, не существовало.

СТАРАЯ ТЕОРИЯ ПРОСТРАНСТВА

Совсем пустое пространство в качестве носителя физических изменений и процессов не допускалось. Пространство представляло, если так можно выразиться, сцену, на которой материально действующие лица разыгрывают драму. Отсюда ясно, что Ньютон, рассматривая факт распространения света в пустом пространстве, должен был принять гипотезу, что свет также состоит из материальных частиц, взаимодействующих с весомой материей посредством особых сил. В этом смысле взгляды Ньютона на природу включали третий тип материальных частиц, хотя эти частицы должны были иметь, конечно, свойства, очень непохожие на свойства частиц, образованных другими формами материи. Световые частицы фактически способны возникать и исчезать. Уже в XVIII в. было ясно (из опытных данных), что свет распространяется в пустом пространстве с определенной скоростью. Этот факт, очевидно, плохо укладывался в теоретическую схему Ньютона: действительно, по каким соображениям световые частицы не могут двигаться через пространство с произвольной скоростью? Поэтому не приходится удивляться, что теоретическая система, построенная Ньютоном, была опрокинута теорией света. Это было сделано волновой теорией света Гюйгенса — Юнга — Френеля, к которой привела упорно сопротивлявшихся физиков совокупность интерференционных и дифракционных явлений. На основе этой теории можно было предсказывать широкий круг явлений вплоть до тончайших деталей. Это привело в восторг физиков. Изложению теории посвящены многочисленные монографии и учебники. Стоит ли удивляться тому, что ученые не заметили трещину, которую вызвала эта теория в монументе их вечного божества? Потому что фактически эта теория разрушила убеждение, что все реальное в мире может быть истолковано как движение частиц в пространстве. Согласно этой теории, световые волны являются не более, чем колебательными состояниями пустого пространства, и пространство, таким образом, уже не играет пассивной роли сцены для физических явлений. Гипотезой об эфире удалось замазать эту трещину и сделать ее незаметной.

Эфир проникал повсюду, заполнял все пространство; его пришлось принять как новую форму материи. Однако при этом проглядели, что этим вдохнули жизнь в пространство само по себе. До известной степени эфир тождествен с пространством и был чем-то, что придавалось самому пространству. Свет теперь рассматривался как динамический процесс, происходящий с самим пространством. Таким образом, теория поля появилась на свет как незаконное дитя ньютоновой физики, хотя было бы куда разумнее, если бы оно сразу было узаконено.

Чтобы полностью осознать перелом в точке зрения, требовался чрезвычайно оригинальный ум, который мог сразу заглянуть

в сердцевину вопроса, ум, который никогда не погрязал в формулах. Таким избранником оказался Фарадей. Он инстинктивно восставал против идеи непосредственного действия сил на расстоянии — это казалось ему противоречащим любому простейшему наблюдению. Если какое-то наэлектризованное тело притягивает или отталкивает второе тело, то это осуществляется отнюдь не прямым действием первого тела на второе, но посредством определенного промежуточного действия. Первое тело приводит пространство в непосредственной близости от него в определенное состояние, которое распространяется в более удаленные части пространства, согласно вполне определенному пространственно-временному закону распространения. Это состояние пространства и называется «электрическим полем». Второе тело испытывает действие силы, потому что оно находится в поле первого тела, и наоборот. Таким образом, «поле» обеспечивает нам некоторую схему рассуждений, которая позволяет избежать представления о действии на расстоянии. Фарадею принадлежит также смелая мысль о том, что при известных условиях поля могут отрываться от порождающих их тел и двигаться далее по пространству в виде свободных полей: это и была его интерпретация света.

Позже Максвелл нашел удивительную совокупность формул, которая сегодня кажется нам простой и которая перекинула мост между электромагнитной теорией и теорией света. Оказалось, что свет состоит из быстро осциллирующих электромагнитных полей.

Когда Герц в 80-х годах прошлого столетия подтвердил существование электромагнитных волн и установил их тождество со светом своими удивительными экспериментами, великая интеллектуальная революция в физике постепенно начала завершаться. Люди начали привыкать к мысли, что физические состояния пространства и есть конечная физическая реальность. Это стало особенно ясно, когда Лоренц в своих глубоких теоретических работах показал, что даже внутри весомых тел электромагнитные поля не следует рассматривать как состояния материи, но как состояния пустого пространства, в котором материальные атомы распределены достаточно просторно.

НЕУДОВЛЕТВОРЕННОСТЬ ДУАЛИЗМОМ ТЕОРИИ

К концу столетия у физиков возникло чувство неудовлетворенности теорией, допускающей два рода фундаментальной физической реальности: с одной стороны — поля, с другой — материальные частицы. Были сделаны попытки представить материальные частицы как структурные образования поля, например как места его наибольшей концентрации. Любой способ такого представления частиц на основе теории поля был бы великим

достижением, но несмотря на все усилия ученых, попытки остались безуспешными. Сегодня этот дуализм гораздо острее и куда более тревожен, чем это было лет десять назад. Это связано с последними тенденциями развития квантовой теории, в которой теория континуума (теория поля) и существенно дискретная интерпретация элементарных структур и процессов ведут между собой острую борьбу за первенство.

Не будем рассматривать вопросы, касающиеся молекулярной теории, остановимся на достижениях теории поля в наше время.

Эти достижения обязаны теории относительности, которая за прошедшие шесть месяцев вступила в третью стадию своего развития. Коротко изложим основные точки зрения, соответствующие этим трем стадиям, и их связь с теорией поля.

Первая стадия — специальная теория относительности — обязана своими истоками главным образом максвелловской теории электромагнитного поля. Из этой теории (а также согласно опытно установленному факту, что не существует никакого физически обнаруживаемого состояния движения, которое можно было бы назвать «абсолютным покоем») возникла новая теория пространства и времени. Эта теория отказалась от абсолютного характера представления об одновременности двух пространственно разделенных событий. Известно, что некоторые философы пытаются отчаянно защищаться от этой простой теории потоком громких, но пустых слов.

С другой стороны, в меньшей мере понятна та роль, которую сыграла специальная теория относительности для своего предка — максвелловской теории электромагнитного поля. До создания специальной теории относительности электрическое и магнитное поля рассматривались как существующие независимо, несмотря на тесную причинную связь между ними, определяемую уравнениями Максвелла. Специальная теория относительности выявила, что эта причинная связь соответствует тождественности этих двух типов полей по существу. Действительно, одно и то же состояние пространства, которое в одной системе координат проявляется как чисто магнитное поле, одновременно в другой системе координат, находящейся в относительном движении, проявляется как электрическое поле, и наоборот. Соотношения этого рода, выявившие тождественность различных представлений теории поля, повысив ее логическую внутреннюю согласованность, — характерная особенность теории относительности. Например, специальная теория относительности обнаружила фундаментальную тождественность понятий инертной массы и энергии. Все это общеизвестно и упоминается лишь для того, чтобы подчеркнуть тенденцию к единству, которая преобладает во всем развитии теории.

Обратимся ко второй стадии развития теории относительности, к так называемой общей теории относительности. Эта теория также исходит из опытного факта, который до этих пор не полу-

чал удовлетворительного объяснения, — тождества инертной и тяжелой массы, или, другими словами, из факта, хорошо известного со времен Галилея и Ньютона, что все тела в поле земного тяготения падают с одинаковым ускорением. Общая теория относительности использует в качестве основы специальную теорию и видоизменяет ее: признание, что не существует никаких состояний движения, которые были бы каким-то образом физически выделены, — т. е., что не только скорость, но и ускорение не имеет абсолютного значения, — составляет исходную точку теории. Это влечет значительно более глубокое видоизменение представлений о пространстве и времени, чем те, которые были связаны со специальной теорией. Потому что, если даже специальная теория относительности и заставила нас слить пространство и время в невидимый четырехмерный континуум, то евклидов характер континуума в этой теории сохранился существенно неизменным. В общей теории относительности эта гипотеза, принимающая евклидов характер пространственно-временного континуума, должна быть оставлена. Структура континуума определяется структурой так называемого риманова пространства. Прежде чем мы попытаемся объяснить, что это значит, напомним, чего достигла эта теория.

Общая теория относительности представляет точную теорию гравитационного поля, которое оказалось в определенной связи с метрическими свойствами континуума. Теория гравитации, которая несколько не продвинулась со времен Ньютона, оказалась включенной в фарадеевскую концепцию поля. Это означает, что никакого произвольного выбора закона поля не было сделано. В то же время тяготение и инерция были слиты в неразрывное единство. Подтверждения, которые получила эта теория в последние годы в результате измерения отклонения световых лучей в гравитационном поле и спектроскопических исследований двойных звезд, хорошо всем известны.

Характерными особенностями, которые резко отделяют общую теорию относительности, более того, новую, третью, стадию теории, единую теорию поля, от других физических теорий, являются степень привлечения формальных спекуляций, скудость экспериментального базиса, смелость теоретических построений и, наконец, фундаментальное предположение о единстве законов природы и возможности их умозрительного постижения. Именно эта черта, которая представляется слабостью физикам, склонным к реализму или позитивизму, особенно привлекательна, я бы сказал чарующа, для людей математического склада ума. Мейерсон в своих великолепных исследованиях по теории познания справедливо сопоставил интеллектуальный подход теоретика-релятивиста с подходом Декарта или даже Гегеля. В его изложении такой физик не найдет ни малейшего осуждения своей точки зрения.

Однако, в конечном счете, только опыт вынесет решающий приговор.

Сейчас в защиту теории можно привести следующие соображения. Рост научных знаний должен приводить к тому, что формальная простота будет достигаться лишь за счет роста расстояния, или щели между основными гипотезами теории, с одной стороны, и непосредственно наблюдаемыми фактами, с другой. Тем самым теория вынуждена переходить все более и более от индуктивного метода к дедуктивному, несмотря на то, что всегда остается неизменным самое существенное требование к любой научной теории — теория должна соответствовать фактам. Мы подошли к сложной задаче — изложить идею методов, применяемых в математических построениях, приводящих к общей теории относительности и новой единой теории поля.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Общая проблема состоит в следующем: какие простейшие формальные структуры можно приписать четырехмерному континууму и какие простейшие законы, управляющие этими структурами, можно принять. Следует найти математическое выражение для физических полей в этих формальных структурах и для физических законов поля — уже известных с определенной степенью точности из предшествующих исследований — в простейших законах, которым подчиняется структура.

Представления, которые используются в этой связи для четырехмерного континуума (пространства-времени), могут быть объяснены на примере двумерного континуума (поверхности).

Представим лист бумаги, разграфленный на миллиметровые квадратики. Что значит, когда говорят, что линованная поверхность двумерна? Если задать определенную точку P на поверхности, ее положение определяется двумя числами. Таким образом, начиная с нижнего левого угла, мы движемся вправо, пока не дойдем до нижнего конца той вертикали, на которой лежит точка P . Допустим, что при этой операции мы прошли мимо X нижних концов вертикальных (миллиметровых) линий. Затем, двигаясь вверх к точке P , пересечем Y горизонтальных линий. В этом случае точка P однозначно описывается числами X и Y (координатами). Если взять вместо линованной миллиметровой бумаги какую-то растянутую или деформированную поверхность, можно использовать то же определение. Однако в этом случае отсчитываемые линии не будут ни горизонталями, ни вертикалями, ни прямыми линиями вообще. Та же точка будет характеризоваться, конечно, иными числами, но возможность задавать точку с по-

мощью двух чисел (гауссовы координаты) по-прежнему сохраняется. Если точки P и Q расположены недалеко одна от другой, их координаты отличаются весьма незначительно.

Когда точка задается двумя числами в указанном смысле, говорят о двумерном континууме (поверхности).

МЕТРИКА РИМАНА

Рассмотрим на поверхности две близкие точки P и Q , недалеко от них другую пару точек P' и Q' . Какой смысл имеет утверждение, что расстояние PQ равно расстоянию $P'Q'$? Это утверждение имеет ясный смысл лишь тогда, когда мы располагаем небольшой измерительной линейкой, которую можно переносить от одной пары точек к другой, и если результат сравнения не зависит от свойств выбранной измерительной линейки. Если эти условия выполняются, расстояния PQ и $P'Q'$ можно сравнить между собой. Если континуум обладает таким свойством, то говорят, что он имеет метрику. Безусловно, расстояние между двумя точками P и Q должно зависеть от разностей координат (dx , dy). Но форма этой зависимости (a priori) неизвестна. Если она имеет вид

$$ds^2 = g_{11} dx^2 + 2g_{12} dx dy + g_{22} dy^2,$$

говорят о метрике Римана.

Если возможно выбрать координаты так, что это выражение приводится к виду

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

(теорема Пифагора), то рассматриваемый континуум — евклидов (плоский).

Ясно, что евклидов континуум — это частный случай риманова континуума. Обратное, риманов континуум есть такой метрический континуум, который является евклидовым в бесконечно малой области, но отнюдь не в конечной. Величины g_{11} , g_{12} , g_{22} определяют метрические свойства поверхности, метрическое поле.

Привлекая эмпирические данные, касающиеся свойств пространства, особенно закон распространения света, можно показать, что пространственно-временной континуум имеет риманову метрику. Величины g_{11} и т. д., относящиеся к нему, определяют не только метрику континуума, но и гравитационное поле. Закон, которому подчиняется гравитационное поле, является ответом на вопрос, каким простейшим математическим условиям должна подчиняться метрика (т. е. g_{11} и т. д.). Ответ дается найденным законом для поля гравитации, который оказался более точным, чем

закон Ньютона. Этот примитивный очерк претендует лишь на то, чтобы дать общее представление о том смысле, который я вкладываю в выражение «спекулятивные» методы общей теории относительности.

РАСШИРЕНИЕ ТЕОРИИ

Эта теория, соединившая метрику и гравитацию, могла бы считаться вполне удовлетворительной, если бы в природе существовали только гравитационные поля и не было бы электрических полей. Последние можно включить в общую теорию относительности, принимая и видоизменяя уравнения Максвелла для электромагнитного поля; в отличие от гравитационных полей, эти уравнения не выражают здесь структурные свойства пространственно-временного континуума, а являются логически независимыми построениями. Эти два типа полей причинно связаны в теории, но не сливаются в единое целое. Однако едва ли свободное пространство обладает условиями или состояниями двух существенно различных типов. Напротив, естественно ожидать, что так получается единственно потому, что структура физического континуума описывается римановой метрикой не исчерпывающим образом.

Новая единая теория поля устраняет этот недостаток, представляя оба типа полей как проявления одного всеобъемлющего типа пространственной структуры в пространственно-временном континууме. Стимулом к созданию новой теории явилось открытие структуры, промежуточной между римановой структурой пространства и евклидовой, которая богаче первой по формальным соотношениям, но беднее, чем последняя. Рассмотрим двумерное риманово пространство в виде поверхности куриного яйца. Поскольку эта поверхность вложена в наше (с достаточной точностью) евклидово пространство, она обладает римановой метрикой. Расстояние между двумя соседними точками P и Q на поверхности имеет определенный смысл. Определенный смысл имеет и утверждение, что две пары таких точек (PQ) и ($P'Q'$), расположенные в различных частях поверхности яйца, расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Нет возможности сравнить направление PQ с направлением $P'Q'$. Бессмысленно требовать, чтобы $P'Q'$ было выбрано параллельно PQ . В соответствующей евклидовой геометрии двух измерений — евклидовой геометрии на плоскости — различные направления могут сравниваться между собой. Соотношения параллелизма могут существовать между линиями, расположенными в различных частях плоскости на произвольном удалении друг от друга (параллелизм на расстоянии). В этом отношении евклидов континуум богаче по своим соотношениям, чем риманов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОТКРЫТИЕ

Новая единая теория поля опирается на следующее математическое утверждение: существуют континуумы с римановой метрикой и параллелизмом на расстоянии, которые, тем не менее, не являются евклидовыми. Так, в случае трехмерного пространства, чем такой континуум отличается от евклидова?

В таком континууме существуют линии, элементы которых параллельны друг другу. Мы называем такие линии «прямыми линиями». Можно говорить о двух параллельных прямых линиях, как и в евклидовом случае.

Выберем две такие параллельные линии E_1L_1 и E_2L_2 и отметим на каждой соответственно точки P_1 и P_2 . На прямой E_1L_1 выберем точку Q_1 . Если провести через точку Q_1 прямую линию Q_1R , параллельную прямой P_1P_2 , в евклидовой геометрии эта линия пересечет прямую E_2L_2 . В новой геометрии, которую мы используем, линии Q_1R и E_2L_2 , вообще говоря, не пересекаются. В этом смысле применяемая геометрия является не только специализацией римановой геометрии, но и обобщением геометрии Эвклида. Я думаю, что наш пространственно-временный континуум обладает структурой именно такого типа. Математическая задача, решение которой, на мой взгляд, приводит к правильным законам поля, должна формулироваться следующим образом. Каковы наипростейшие и наиболее естественные условия, которым континуум этого рода должен удовлетворять? Ответ на этот вопрос, который я попытался дать в своей новой работе, позволяет получить единые законы поля для гравитации и электромагнетизма.

О СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Теория поля, представляющая, с моей точки зрения, наиболее глубокую концепцию теоретической физики со времени основания последней Ньютоном, зародилась в уме Фарадея. Как просто выглядит эта идея теперь и все же насколько она величественна! Вместо того, чтобы думать: «Электрическая частица e_1 действует на другую электрическую частицу e_2 через пространство и вызывает появление действующей на последнюю движущей силы», Фарадей мыслил: «Электрическая частица уже самым своим существованием порождает изменение состояния пространства в своей непосредственной окрестности (электрическое поле). Пространственное распределение и изменение во времени этого поля подчиняются законам, присущим пространству. В силу этих законов поле, порождаемое частицей e_1 , доходит до частицы e_2 и действует там на нее». Вскоре из этой идеи выросли замечательные законы электромагнитного поля Максвелла. Герц окончательно показал, что эта теория имеет преимущество перед ньютоновой теорией дальнего действия, а вслед затем Г. А. Лоренц доказал, что это поле присутствует в пустоте всюду, в том числе и внутри вещества, так как элементарные кирпичики вещества — по крайней мере с точки зрения электродинамики — представляют собой не что иное, как источники электрического поля. Таким было состояние теории к концу столетия.

Прежде чем рассматривать дальнейшее развитие теории поля, я хочу сделать краткое замечание о целях и путях теоретического исследования вообще. Теория преследует две цели.

1. Охватить по возможности все явления и их взаимосвязи (полнота).

2. Добиваться этого, взяв за основу как можно меньше логически взаимно независимых понятий и произвольно установленных соотношений между ними (основных законов или аксиом). Эту цель я буду называть «логической единственностью».

Грубо, но честно, второе пожелание можно выразить также следующим образом: мы хотим не только знать, *как* устроена природа (и *как* происходят природные явления), но и по возможности достичь цели, может быть, утопической и дерзкой на вид, — узнать, почему природа является именно такой, а не другой. В этом ученые находят наивысшее удовлетворение.

Например, из представлений молекулярно-кинетической теории теплоты выводится определенное количественное соотношение между давлением, объемом и температурой (уравнение состояния) одноатомного газа, с одной стороны, и его теплоемкостью, с другой; выводится аналогичное количественное соотношение между вязкостью и теплопроводностью таких газов. Во всех подобных случаях речь идет о том, чтобы понять эмпирическую закономерность как логическую необходимость. Приняв однажды основную гипотезу молекулярно-кинетической теории теплоты, исследователь ощущает до известной степени, что эти взаимосвязи в том виде, в каком они существуют, сам бог не мог бы изменить, как не мог бы превратить число 4 в простое¹. В этом состоит прометеевский элемент научного творчества, который выше был назван школьным выражением «логическая единственность». Для меня в этом и заключается постоянное очарование научного мышления; это образует, так сказать, религиозный базис научных изысканий.

Вернемся после этого отступления к теории поля, дальнейшие шаги которой следуют логике. Из равноправности всех инерциальных систем, доказанной на опыте, в сочетании с опытным законом постоянства скорости света, нашедшим концентрированное выражение в электродинамике Максвелла — Лоренца, выросла специальная теория относительности. Она принесла нам далеко идущее объединение самостоятельных до того теоретических понятий; в единые сущности слились, с одной стороны, электрическое и магнитное поля, с другой — инертная масса и энергия. Этими достижениями мы также обязаны теории поля.

Следующей ступенью на пути к объединению была общая теория относительности. Она внесла логическое единство в раздельные до того понятия инерции и тяготения, эмпирическая связь между которыми уже давно была установлена понятием массы. Однако величайшая изящность этой теории заключается в том, что, исходя из совершенно общих логических принципов (равноправие всех состояний движения), она позволила вывести логическим путем сложный закон гравитационного поля. Этот закон получился в ответ на вопрос, каковы простейшие законы, которым можно подчинить четырехмерный континуум, обладающий

¹ Понятно, что эти предложения не претендуют на теоретико-познавательную мудрость, а только иллюстрируют определенные переживания исследователя.

метрикой Римана? Удача этой попытки вывести законы природы чисто умозрительным путем, основываясь на убеждении в формальной простоте действительности, поощряет к дальнейшему движению по этому пути, опасности которого отчетливо должен представлять себе каждый, кто отважится вступить на него¹.

Отвлекаясь теперь от квантовой загадки, разрешение которой, несмотря на столь многообещающие начинания, по-моему, дело далекого будущего, мы можем считать теорию поля удовлетворительной только в том случае, если она будет рассматривать электрическое и гравитационное поля как проявление единой структуры четырехмерного пространственно-временного континуума. Для решения этой проблемы опыт, по-видимому, не дает нам ничего, однако можно надеяться, что среди результатов готовой, полученной умозрительным путем теории найдутся и такие, которые допускают проверку на опыте.

Для решения упомянутой проблемы существует теоретическая идея Г. Вейля, впоследствии обобщенная А. Эддингтоном, а также вторая идея, которую я исследую в последние годы. В дальнейшем я попытаюсь изложить лишь сущность метрических структур четырехмерного континуума, положенных в основу этих теорий, и несколько подробнее познакомить с рассматриваемой мной теорией.

Общим для всех теорий является следующее. Мир понимается как четырехмерный континуум, отдельные точки которого P сопоставляются с пространственно-временными непротяженными точечными событиями физического бытия. Каждой такой точке ставится в соответствие четверка координат (x_1, x_2, x_3, x_4) таким образом, что «близким пространственно-временным» событиям соответствуют близкие значения координат. В каждой точке имеется бесконечно малый конус (световой конус), точки P' на поверхности которого характеризуются тем, что в них можно посылать световые сигналы из P . В бесконечно малой локальной системе координат этот конус описывается уравнением

$$dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2 = 0 \quad (1)$$

или в произвольной системе координат $(x_1, \dots, x_4)$ уравнением

$$g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = 0. \quad (2)$$

В этом смысле пространственные функции $g_{\mu\nu}$, определенные в соответствии со сказанным лишь с точностью до множителя, выражают физически реальное свойство пространства — законы распространения световых сигналов.

¹ Сравнение Мейерсона с гегелевской постановкой цели, конечно, до известной степени оправдано; оно ярко освещает подчеркиваемую здесь опасность.

Согласно теории Вейля, все физические сущности, например гравитационное и электромагнитное поля, свойства масштабов и часов (метрическое поле), должны сводиться только к одной этой структуре. В самом деле, эта теория наряду с описанием тяготения дает также описание электромагнитного поля, поскольку она естественно приводит к существованию четырех величин $F_{\mu\nu}$, антисимметричные производные которых имеют тензорный характер. Слабость этой теории с самого начала заключалась в том, что она противоречила элементарному свойству метрики, согласно которому поведение масштабов или часов не зависит от их предтеории.

Чисто формально основы этой теории можно описать следующим образом. Если мы проведем из одной точки P континуума два линейных элемента (или элементарных вектора) PP' или PP'' с координатами $(d'x^1, d'x^2, d'x^3, d'x^4)$ или $(d''x^1, \dots, d''x^4)$, то их численное отношение должно иметь объективное значение и его можно вычислить из квадратичной формы (2). Эта квадратичная форма, определенная с точностью до множителя λ , задает также относительное направление (угол) двух векторов, исходящих из одной точки. Напротив, ни отношению двух линейных элементов (т. е. отношению величин), ни отношению векторов, начинающихся в двух разделенных конечным расстоянием точках континуума (т. е. отношению направлений), нельзя приписывать никакого реального смысла. Удивительно, что для этого континуума, столь бедного структурными свойствами, все-таки можно построить инвариантную теорию с такими формальными свойствами, что ее можно попытаться использовать для изображения физических свойств пространства.

Следующий континуум, более богатый метрическими свойствами, это — континуум Римана. В этом континууме реальное значение приписывается отношению величин не только двух векторов, исходящих из точек P и P' , разделенных конечным расстоянием. Математически это следует из того, что величина

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (3)$$

для каждого линейного элемента имеет определенное значение (с точностью до несущественного множителя, не зависящего от x^ν). То обстоятельство, что математики обратили внимание сначала на континуум, обладающий такой структурой, понятно с исторической точки зрения. Всякая поверхность, вложенная в трехмерное евклидово пространство, есть двумерный континуум Римана. Как известно, с этой точки зрения Гаусс рассматривал теорию поверхностей; затем Риман обобщил ее, поняв, что вложение поверхностей в евклидово пространство является несущественным и что существенные элементы теории можно распространить на произвольное число измерений. Как известно, уже Риман думал, что

континуум нашего пространственного эмпирического мира, возможно, обладает подобной метрической структурой.

Уравнения гравитационного поля общей теории относительности являются простейшими ковариантными относительно преобразований координат дифференциальными уравнениями, которым можно подчинить величины $g_{\mu\nu}$ риманова континуума; при этом сами функции $g_{\mu\nu}$ (или величина ds) описывают как метрические соотношения в пространственно-временном континууме, так и гравитационное поле. С точки зрения логического единства общая теория относительности была бы совершенной теорией, если бы величины $g_{\mu\nu}$ в ней описывали также электромагнитное поле. То, что это не так, было ясно с самого начала; в теорию пришлось ввести логически самостоятельную линейную форму $\varphi_i dx^i$, причем величины φ^i играли роль электромагнитного потенциала. Однако кажется невероятным, чтобы гравитационные и электрические поля в пространстве имели различную природу (хотя между ними и существует причинная связь). Теория Римана еще не позволяет объяснить единство сил природы, сомневаться в котором для инстинкта теоретика абсолютно невозможно.

После двенадцати лет поисков, полных разочарований, я открыл наконец метрическую структуру континуума, промежуточную между римановой и евклидовой, исследование которой ведет к действительно единой теории поля. Это видно из следующего рассуждения. Геометрия Евклида отличается от геометрии Римана в широком смысле тем, что в ней два разделенных конечным расстоянием линейных элемента, или вектора, можно сравнивать не только по величине, но и по направлению. Но евклидов континуум представляет собой не единственный частный случай риманова континуума, в котором возможно это сравнение, существуют континуумы более общего вида с «абсолютным (далеким) параллелизмом» векторов. Новую структуру пространства математически можно описать следующим образом.

Наличие метрики Римана гарантирует, что в каждой области n -мерного континуума существует ортогональный n -под (n -репер). Если принять его в качестве локальной системы координат, то величина линейного элемента в такой системе будет задаваться формулой¹

$$ds^2 = \sum (dx^a)^2. \quad (4)$$

Предположим, что в общей системе координат величины означают n компонент a этого n -пода. Тогда компоненты линейного элемента dx^a будут выражаться формулой

$$dx^a = h^a dx. \quad (5)$$

¹ По предложению Вейценбека отнесение к оси локального n -пода выражается левым индексом.

Обратные соотношения имеют вид

$$^a dx = h_a dx^a, \quad (6)$$

где коэффициентами являются нормированные миноры величин h . Из соотношений (4) и (5) следует

$$ds^2 = h_a h_a dx^a dx^a,$$

так что коэффициенты метрики Римана $g_{\mu\nu}$ выражаются через величины h формулой

$$g_{\mu\nu} = h_\mu h_\nu. \quad (7)$$

В этой теории величины h являются элементарными переменными поля, через которые выражаются метрические функции g .

Опишем теперь существование абсолютного параллелизма. В одной точке P_0 ориентацию локального ортогонального n -пода можно выбрать произвольно. Но для других точек она уже будет определяться однозначно условием, чтобы все соответственные оси локальных n -подов были взаимно параллельными. Тогда параллельные векторы будут иметь одинаковые локальные компоненты. Таким образом, для параллельного переноса вектора A из точки P в бесконечно близкую точку P' выполняется формула

$$\delta^a A = 0 \quad (8)$$

или, в силу соотношений (5), (6) и (8),

$$\begin{aligned} \delta A^a &= \delta (h^a A) = \frac{\partial h^a}{\partial x^a} A \delta x^a = \frac{\partial h^a}{\partial x^a} h_a A^a \delta x^a = \\ &= h_a \frac{\partial h^a}{\partial x^a} A^a \delta x^a = -h^a \frac{\partial h_a}{\partial x^a} A^a \delta x^a. \end{aligned} \quad (9)$$

Полагая

$$\Delta_{\sigma\tau}^a = h^a h_{\sigma\tau} \left(= h^a \frac{\partial h_\sigma}{\partial x^\tau} \right),$$

перенишем закон параллельного переноса в виде

$$\delta A^a = -\Delta_{\sigma\tau}^a A^\sigma \delta x^\tau. \quad (10)$$

Здесь величины Δ в известном смысле аналогичны символам Кристоффеля $\Gamma_{\sigma\tau}^a$ в геометрии Римана, поскольку они являются коэффициентами в соотношении, выражающем закон параллельного переноса. Однако именно в этих величинах проявляется противоположность двух структур. Величины Γ в геометрии Римана симметричны по нижним индексам, но выраженный через них закон переноса не интегрируется. Величины Δ , напротив, симметричны, но выражаемый через них закон переноса интегрируется. Величины Δ , как и образованные из них антисимметричные выражения

$$\Delta_{\sigma\tau}^a = \Delta_{\sigma\tau}^a - \Delta_{\tau\sigma}^a, \quad (11)$$

обладают тензорным характером. Свертыванием этого тензора получается вектор $\varphi_\sigma = \Lambda_{\sigma\alpha}^\alpha$, играющий в физических приложениях теории роль электромагнитного потенциала. Существование тензора $\Lambda_{\sigma\tau}^\nu$ обуславливает наличие инвариантов, образованных из величин h и их первых производных. Простейшие законы, которым подчиняется такой континуум, находятся следующим образом. Образуем линейную комбинацию

$$I = AI_1 + BI_2 + CI_3 \quad (12)$$

трех инвариантов

$$I_1 = g^{\mu\nu} \Lambda_{\mu\beta}^\alpha \Lambda_{\nu\alpha}^\beta, \quad (12a)$$

$$I_2 = g^{\mu\nu} \Lambda_{\mu\alpha}^\alpha \Lambda_{\nu\beta}^\beta,$$

$$I_3 = g^{\mu\sigma} g^{\nu\tau} g_{\lambda\xi} \Lambda_{\mu\nu}^\lambda \Lambda_{\sigma\tau}^\xi.$$

Далее с функцией Гамильтона

$$\mathfrak{H} = |^{\mu} h_{\nu}| I = hI \quad (13)$$

запишем вариационный принцип

$$\delta \{ \mathfrak{H} d\tau \} = 0 \quad (14)$$

для таких вариаций величин h_ν , которые обращаются в нуль на пределах интегрирования. Тогда получаются 16 уравнений для 16 полевых переменных h .

Разработка и физическая интерпретация теории затрудняется по той причине, что для выбора соотношений между постоянными A , B и C априори не существует никаких оснований. Оказывается, что при выборе постоянных

$$\begin{aligned} B &= -A, \\ C &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

получаются уравнения поля, в первом приближении согласующиеся с известными законами гравитационного и электромагнитного полей. Вычисления, проведенные совместно с Г. Мюнцем, показали даже, что поле материальной точки без электрического заряда в развитой здесь теории в точности совпадает с полем, которое дает первоначальная общая теория относительности.

Вывод и обсуждение уравнений поля будут приведены в другом месте. Следует лишь упомянуть, что указанная выше специализация¹, выражаемая равенствами (15), должна предприниматься только в уравнениях поля, а отнюдь не в уравнении (14), так как в последнем случае будут теряться уравнения электромагнитного поля.

¹ По крайней мере, соотношение $B = -A$.

Благодаря полученным до сих пор результатам я почти не сомневаюсь, что указанное здесь соединение метрики Римана с постулатом о существовании абсолютного параллелизма дает естественное описание физических свойств пространства в рамках теории поля.

Между тем более глубокий анализ общих свойств структур описанного выше рода привел меня к убеждению, что наиболее естественные выражения для уравнений поля следует получать не из принципа Гамильтона, а другим путем.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

II Положение людей науки отягощается тем, что различные языки тормозит их взаимопонимание. Жажда познания *космических связей*, воспринимаемых нами в виде символов, которые доставляются нашими несовершенными чувствами, сглаживает эти трудности. Никогда еще стремление к познанию истины не было таким сильным, как теперь, и пока оно будет существовать, можно смотреть в будущее с надеждой. Такая точка зрения помогает смягчить страдания человечества, а также является *существенной для преодоления современного кризисного периода*.

I В физической науке существовали единые понятия. *Ныне они расщепились на две ветви, одна из которых принадлежит квантовой теории, вторая — (релятивистской) теории поля.* Их объединение желательно, но еще не достигнуто. Вторая ветвь могла бы развиваться на основе идей Фарадея — Максвелла о замене понятия массы понятием электромагнитного поля. Идею, что вещество можно рассматривать как места особого сгущения поля, осуществить пока не удалось. *Однако сохраняется стремление к тому, чтобы многообразие явлений сводилось в чисто теоретическую систему из как можно меньшего числа элементов.*

Так возникли *специальная теория относительности и общая теория относительности*. Задача последней заключается в однозначном описании движения точки в пространстве и времени без использования вспомогательного понятия отклоняющей силы. Необходимо найти *систему координат*, в которой движение точки выглядит прямолинейным и равномерным. Это представляется несколько нелогичным. Мах ясно понимал это и искал формулировку, описывающую движение без ссылки на систему координат. *Теория относительности не исключает систему координат, но вы-*

бирает одну, соответствующую условиям, и пытается найти законы движения, независимые от выбора системы координат.

Без введения Фарадеем и Максвеллом *понятия электромагнитного поля* теория относительности была бы невозможна. Это понятие ведет к понятию гравитационного поля, которое объясняет явления тяготения, но включает в себя электромагнитные явления. Правда, хотя их и удалось уложить в рамки теории относительности, но в архитектурном построении теории отсутствовало логическое единство.

II

Представив себе мысленно, с целью получить возможно более простые математические формулировки, что вещество во Вселенной распределяется всюду равномерно с некоторой средней плотностью, можно считать, что оно находится внутри большого шара, количество вещества в котором пропорционально третьей степени радиуса, а поверхность — второй степени радиуса. В центре шара напряженность гравитационного поля равна нулю, но возрастает вдоль радиуса к внешней поверхности пропорционально радиусу шара. Следовательно, гравитационное поле снаружки все усиливается и усиливается. Однако такой мир не мог бы существовать, если сохраняется закон тяготения Ньютона. Эту трудность можно преодолеть, добавляя в формулы новый член. Из уравнений следует, что *пространство должно быть неевклидовым, т. е. определяемым с помощью прямолинейной прямоугольной системы координат, но сферическим.* Между радиусом этого сферического мира и средней плотностью существует определенное соотношение. *Чем меньше плотность массы, тем больше радиус.* Зная среднюю массовую плотность, можно было бы определить и размеры мира.

III

Астрономия заключает из опыта, что чем дальше находится от нас небесные светила, тем меньше их яркость, затем, что они движутся от нас тем быстрее, чем дальше они расположены. Это нашло бы свое выражение в сдвиге спектральных линий по сравнению с их положением в спектре, получаемом на Земле. Открытие и спектроскопическое изучение внегалактической туманности наблюдателями обсерватории Маунт-Вильсон подтвердило это предположение. Это привело одного русского математика¹ к мысли, что *видимая материя находится в состоянии расширения.* Наблюдения де Ситтера и других показали, что это движение расширения вполне вероятно. Теперь напрашивалась мысль — *нельзя ли объяснить его, применяя старое уравнение гравитации без прибавления каких-либо новых членов?* Оказалось, что тогда можно

¹ А. А. Фридмана. — Прим. ред.

сразу вычислить расширение, предполагая, что сдвиг спектральных линий действительно соответствует движению небесного тела.

При этом значение радиуса мира по порядку величины исчисляется сотнями миллионов световых лет. Этот порядок величины приблизительно соответствует значениям, доступным нам с нашими инструментами, а средняя плотность изображается дробью, в числителе которой стоит единица, а в знаменателе единица с 26 или 27 нулями. Если мир расширяется, то его объем должен был начаться с нуля. Однако это кажется невозможным. Для достижения современной величины тогда потребовалось бы от одного до десяти миллиардов лет. Возраст же Земли, определенный по радиевому методу, составляет около 800 миллионов лет¹. Следовательно, Земля должна была образоваться, когда началось расширение. А будущее? Уравнения предсказывают, что расширение на определенной стадии кончится и тогда должно начаться сжатие, которое будет продолжаться до нулевого объема.

IV

Попытки найти единые законы материи, породить теорию поля и квантовую теорию не прекращались. Речь идет о том, чтобы найти структуру пространства, удовлетворяющую условиям, выдвигаемым обеими теориями. Результатом оказалось *кладбище погребенных надежд*. Я также с 1928 г. пытался найти решение, но снова отказался от этого пути. В противовес этому удалось построение теории на основе идеи, выдвинутой наполовину моим сотрудником профессором доктором Майером. Уже десять лет назад один француз высказал интересную мысль — рассматривать мир как *пятое измерение*². В этом случае получается теория, в которой находят свое место и электромагнитные явления, причем архитектурное единство теории не нарушается. Однако я и Майер полагаем, что пятое измерение не должно появляться. Оно используется только математически для построения компонента, применение которых дает уравнения для электромагнитных явлений, совершенно аналогичные тем, которые получаются в теории относительности для закона тяготения. При этом, конечно, выясняется одна трудность, которая, однако, преодолевается *новым математическим построением*, посредством которого можно ввести соотношение между гипотетическим *пятым измерением* и *четырьмя измерениями пространства*. Таким образом удалось охватить *логическим единством и гравитационное и электромагнитное поля*.

Однако надежда не сбылась. Я полагал, что если бы удалось найти этот закон, то получилась бы теория, применимая к квантам и материи. Но это не так. Построенная теория, по-видимому, разбивается о проблему материи и квантов. Между обеими идеями все еще сохраняется пропасть.

¹ Около 5 млрд. лет по современным оценкам. — Прим. ред.

² Т. Калуза. — Прим. ред.

ПОЛЕ И ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

(Фрагмент из «Эволюции физики»)

ВРЕМЯ, ПРОСТРАНСТВО, ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

Наши новые положения суть:

1. Скорость света в вакууме одинакова во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.

2. Законы природы одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.

Теория относительности начинается с этих двух положений. С этого времени мы не будем применять классического преобразования, так как знаем, что оно противоречит исходным положениям.

В данном случае, как и всегда в науке, важно отказаться от глубоко укоренившихся, часто некритически повторяемых предубеждений. Так как мы видели, что изменения обоих положений приводят к противоречию с экспериментом, то мы должны иметь смелость твердо установить их справедливость и напасть на один возможно слабый пункт, а именно на способ, которым координаты и скорости преобразуются от одной системы координат к другой. Мы хотим сделать выводы из этих двух положений, посмотреть, где и как эти положения противоречат классическому преобразованию, и найти физический смысл полученных результатов.

Можно еще раз использовать пример с движущейся комнатой и наблюдателями внутри и вне ее. Пусть световой сигнал опять излучается из центра комнаты, и вновь мы спрашиваем обоих людей, что они обнаружат, допустив только два вышеуказанных принципа и забыв то, что было предварительно сказано о среде, сквозь которую проходит свет. Приведем их ответ:

Внутренний наблюдатель. Световой сигнал, идущий от центра комнаты, достигнет стен *одновременно*, так как все стены одинаково отстоят от источника света, а скорость света одинакова во всех направлениях.

Внешний наблюдатель. В моей системе координат скорость света совершенно такая же, как и в системе наблюдателя, движущегося вместе с комнатой. Мне нет дела до того, движется ли источник света в моей системе или нет, так как его движение не влияет на скорость света. То, что я вижу, это — световой сигнал, идущий с постоянной скоростью, одинаковой во всех направлениях. Одна из стен стремится убежать от светового сигнала, а другая — приблизиться к нему. Поэтому убегающая стена будет достигнута световым сигналом немного позднее, чем приближающаяся. Хотя эта разность времен прибытия светового сигнала будет очень незначительной, если скорость комнаты мала сравнительно со скоростью света, тем не менее световой сигнал не достигнет обеих противоположных стен, расположенных перпендикулярно к направлению движения, совершенно одновременно.

Сравнивая предсказания обоих наблюдателей, мы обнаруживаем крайне изумительный результат, который явно противоречит несомненно хорошо обоснованным понятиям классической физики. Оба события — достижение стен двумя световыми лучами — одновременны для наблюдателя внутри и неодновременны для наблюдателя вне комнаты. В классической физике у нас были одни часы, одно течение времени для всех наблюдателей во всех системах. Время, а стало быть, и такие слова, как «одновременно», «ранее», «позднее», имели абсолютное значение, не зависящее от какой-либо системы. Два события, происходящие в одно и то же время в одной системе координат, необходимо происходили одновременно во всех системах координат.

Положения, указанные выше, т. е. теория относительности, вынуждают нас отказаться от этого взгляда. Мы описали два события, которые происходят одновременно в одной системе координат, но в разное время в другой системе. Наша задача — понять это следствие, понять смысл предложения: «Два события, одновременные в одной системе координат, не могут быть одновременны в другой системе».

Что мы обозначаем словами: «два одновременных события в одной системе координат»? Интуитивно каждый человек считает, что он понимает смысл этого предложения. Но будем осторожными и постараемся дать строгие определения, так как мы знаем, как опасно переоценивать интуицию. Ответим сначала на простой вопрос.

Что такое часы?

Примитивное субъективное чувство течения времени позволяет нам упорядочить наши впечатления, судить о том, что одно событие происходит раньше, другое позднее. Но чтобы показать, что промежуток времени между двумя событиями равен десяти секундам, нужны часы. Благодаря применению часов понятие времени становится объективным. В качестве часов может быть использовано любое физическое явление, если только оно может быть

повторено столько раз, сколько необходимо. Если мы возьмем интервал между началом и концом такого события за единицу времени, то любые интервалы времени мы можем измерить повторением этого физического процесса. Все часы, от простых песочных до наиболее совершенных, основаны на этой идее. При пользовании песочными часами единицей времени будет являться интервал, в течение которого песок высыпается из верхнего стаканчика в нижний. Тот же физический процесс может быть повторен перевертыванием стакана.

Пусть в двух отдаленных друг от друга точках пространства находится двое идеально идущих часов, точно показывающих одинаковое время. Это положение будет справедливым, несмотря на ту осторожность, с которой мы его проверяем. Но что это в действительности означает? Как можем мы удостовериться, что отдаленные друг от друга часы всегда показывают одинаковое время? Можно использовать один из возможных методов — телевидение. Легко понять, что телевидение берется как пример, само по себе оно несущественно для наших доводов. Я мог бы стоять около одних часов и смотреть на изображение других часов на экране телевизора. Тогда я мог бы судить, показывают ли часы одновременно одинаковое время или нет. Но это не было бы хорошим доказательством. Изображение в телевизоре передается электромагнитными волнами, следовательно, распространяется со скоростью света. На экране телевизора я вижу изображение, посланное некоторое, очень короткое время тому назад, в то время как на часах, стоящих возле меня, я вижу то, что имеет место в настоящий момент. Эту трудность можно легко преодолеть. Для этого нужно рассмотреть изображения обоих часов в точке, одинаково отстоящей от каждого из них, т. е. рассмотреть их в точке, лежащей на середине расстояния между часами. Тогда, если сигналы посланы одновременно, они достигнут меня в один и тот же момент. Если двое хороших часов, наблюдаемых в точке, находящейся посередине между ними, показывают одинаковое время, то они вполне подходят для указания времени событий в двух отдаленных точках.

В механике мы употребляли только одни часы. Но это было не очень удобно, потому что мы должны были производить все измерения вблизи этих часов. Смотря на удаленные от нас часы, например с помощью телевизора, мы всегда должны помнить следующее: то, что мы видим теперь, в действительности произошло раньше, подобно тому, как, рассматривая заход Солнца, мы отмечаем это событие спустя восемь минут после того, как оно имело место. Во все показания часов мы должны вносить поправки, соответствующие нашему расстоянию от часов.

Поэтому неудобно иметь только одни часы. Однако теперь, поскольку мы знаем, как проверить, показывают ли двое, или вообще несколько часов одновременно одно и то же время, и идя

тем же самым путем, мы легко можем вообразить себе в данной системе координат столько часов, сколько нам хочется.

Каждые из них помогут нам определить время событий, происходящих в непосредственном соседстве с ними. Все часы находятся в покое относительно системы координат. Они являются «хорошими» часами: они *синхронизированы*, что означает, что часы одновременно показывают одинаковое время.

В нашей расстановке часов нет ничего удивительного или странного. Вместо одних-единственных часов мы применяем теперь много синхронизированных часов и поэтому можем легко проверить, одновременны ли два отдаленных события в данной системе координат или нет. Они одновременны, если синхронизированные часы вблизи них показывают одинаковое время в момент, когда происходят события. Теперь утверждение, что одно отдаленное событие происходит раньше другого, имеет определенный смысл. Его можно проверить с помощью синхронизированных часов, покоящихся в нашей системе координат.

Все это находится в согласии с классической физикой и не вызывает еще противоречий с классическим преобразованием.

Для определения одновременности событий часы синхронизируются с помощью сигналов. В наших рассуждениях существенно то, что сигналы передаются со скоростью света, со скоростью, которая играет такую фундаментальную роль в теории относительности.

Так как мы хотим заняться важной проблемой о двух системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно относительно друг друга, то мы должны рассмотреть два стержня, снабженных часами. В каждой из обеих систем, движущихся друг относительно друга, наблюдатель имеет теперь свой собственный масштаб со своим собственным набором часов, жестко связанным с масштабом.

При измерениях в классической механике мы употребляли одни часы во всех системах координат. Теперь мы имеем много часов в каждой системе координат. Это различие несущественно. Одни часы были достаточны, но никто не может возражать против употребления многих часов, пока они ведут себя как хорошо синхронизированные часы.

Теперь мы приближаемся к существенному пункту, показывающему, где классическое преобразование противоречит теории относительности. Что происходит, когда двое часов движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга? Физик, держащийся классических взглядов, ответил бы: ничего; их ритм остается одинаковым, и мы можем употреблять для показания времени движущиеся часы так же, как и покоящиеся. Таким образом, согласно классической физике, два события, одновременные в одной системе координат, будут одновременными в любой другой системе.

Но это не единственный возможный ответ. Мы можем столь же легко представить себе движущиеся часы, имеющие ритм, отличный от ритма покоящихся часов. Обсудим теперь эту возможность, не решая пока вопроса о том, изменяют ли на самом деле часы свой ритм при движении или нет. Что означает утверждение, что движущиеся часы изменяют свой ритм? Предположим ради простоты, что в верхней системе координат у нас только одни часы, а в нижней — много. У всех часов одинаковый механизм и нижние часы синхронизированы, т. е. они показывают одновременно одинаковое время. Мы показали (рис. 1) три последовательных положения обеих систем, движущихся друг относительно друга. На первом рисунке положения стрелок верхних и нижних часов ради удобства взяты одинаковыми; так мы их поставили сами. Все часы показывают одинаковое время. На втором рисунке мы видим относительные положения обеих систем спустя некоторое время. Все часы в нижней системе показывают одинаковое время, но часы в верхней системе вышли из общего ритма. Их ритм изменился, и время отличается вследствие того, что часы движутся относительно нижней системы. На третьем рисунке мы видим, что различие в положении стрелок со временем увеличилось. Наблюдатель, покоящийся в нижней системе координат, нашел бы, что движущиеся часы изменили свой ритм. Конечно, тот же результат получился бы, если бы часы двигались по отношению к наблюдателю, покоящемуся в верхней системе координат; в этом случае в верхней системе должно было бы быть много часов, а в нижней только один. Закон природы должен быть одинаков в обеих системах, движущихся друг относительно друга.

В классической механике молчаливо предполагалось, что движущиеся часы не изменяют своего ритма. Это казалось столь очевидным, что едва ли было достойно упоминания. Но ничто не должно считаться слишком очевидным; если мы действительно желаем быть осторожными, мы должны подвергать анализу все положения, принимаемые в физике.

Нельзя считать какое-либо положение бессмысленным только потому, что оно отличается от положения классической физики. Мы можем легко представить себе, что движущиеся часы изменяют свой ритм, если закон этого изменения одинаков для всех инерциальных систем.

Еще один пример. Возьмем метровый стержень; это значит, что длина стержня — один метр, пока он находится в покоящейся

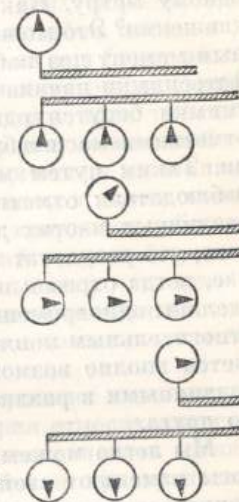


Рис. 1.

системе координат. Пусть он движется прямолинейно и равномерно, скользя вдоль масштаба, представляющего систему координат. Будет ли его длина и в этом случае равна одному метру? Мы должны знать заранее, как определять его длину. Пока стержень был в покое, его концы совпадали с нанесенными на масштабе отметками, расстояние между которыми равнялось одному метру. Из этого мы заключили: длина покоящегося стержня равна одному метру. Как мы измеряем длину этого стержня во время движения? Это можно было бы сделать следующим образом. В данный момент два наблюдателя делают одновременно моментальные фотоснимки начала движущегося стержня и его конца. Поскольку снимки берутся одновременные, мы можем сравнить, с какими отметками масштаба совпадают начало и конец движущегося стержня. Таким путем мы определим его длину. Нужно, чтобы два наблюдателя отметили одновременные события, происходящие в различных частях данной системы. Нет никаких оснований считать, что результат таких измерений будет таким же, как и в случае, когда отрезок покоится. Поскольку фотографии должны быть сделаны одновременно, а одновременность, как мы знаем, является относительным понятием, зависящим от системы координат, то кажется вполне возможным, что результаты этих измерений будут различными в различных системах, движущихся друг относительно друга.

Мы легко можем представить себе, что не только движущиеся часы изменяют свой ритм, но и движущийся стержень тоже изменяет свою длину, если законы изменений одинаковы для всех инерциальных систем координат.

Мы лишь обсуждали некоторые новые возможности, не приводя каких-либо оправданий в пользу их принятия.

Мы помним: скорость света одинакова во всех инерциальных системах координат. Этот факт несовместим с классическим преобразованием. Круг должен быть где-то разорван. Нельзя ли это сделать как раз здесь? Не можем ли мы предположить, что имеют место такие изменения в ритме движущихся часов и в длине движущегося стержня, что постоянство скорости света будет следовать непосредственно из этих предположений? В самом деле, можем! Здесь впервые теория относительности и классическая физика радикально расходятся. Наш довод может быть сформулирован иначе: если скорость света одинакова во всех системах, то движущиеся стержни должны изменять свою длину, движущиеся часы должны изменять свой ритм, а законы, управляющие этими изменениями, являются строго определенными.

Во всем этом нет ничего таинственного или неразумного. В классической физике всегда предполагалось, что часы и в движении, и в покое имеют одинаковый ритм, что масштабы и в движении, и в покое имеют одинаковую длину. Если скорость света одинакова во всех системах координат, если теория относительности

справедлива, то мы должны пожертвовать этим положением. Трудно отделаться от глубоко укоренившихся предрассудков, но другого пути нет. С точки зрения теории относительности, старые понятия кажутся произвольными. Почему надо верить, как это мы делали раньше, в абсолютное время, текущее одинаково для всех наблюдателей во всех системах? Почему надо верить в неизменяемое расстояние? Время определяется часами, пространственные координаты — масштабами, и результат этих определений может зависеть от поведения этих часов и масштабов, когда они находятся в движении. Нет оснований считать, что они будут вести себя так, как нам этого хотелось бы. Косвенное наблюдение, а именно, наблюдение явлений электромагнитного поля показывает, что движущиеся часы изменяют свой ритм, а масштаб — длину, в то время как, основываясь на механических явлениях, мы не думали, чтобы это имело место. Мы должны принять понятие относительного времени в каждой системе координат, ибо это наилучший выход из трудностей. Дальнейший научный успех, достигнутый теорией относительности, показывает, что новый взгляд не должен рассматриваться как печальная необходимость, ибо успехи теории относительности оказались весьма значительными.

До сих пор мы старались показать, что привело к основным положениям теории относительности и как теория относительности вынуждала нас пересматривать и изменять классическое преобразование, по-новому трактуя понятия времени и пространства. Наша цель — указать идеи, образующие основу новых физических и философских взглядов. Эти идеи просты; но в той форме, в которой они здесь сформулированы, они недостаточны для того, чтобы получить выводы не только качественные, но и количественные. Мы опять должны применить наш старый метод объяснения только принципиальных идей и формулировки некоторых выводов без доказательств.

Чтобы сделать ясным различие между взглядом старого физика (назовем его С), верящего в классическое преобразование, и взглядом нового физика (назовем его Н), признающего теорию относительности, вообразим между ними следующий диалог.

С. Я верю в принцип относительности Галилея в механике, ибо я знаю, что законы механики одинаковы в двух системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, или, другими словами, что эти законы инвариантны относительно классического преобразования.

Н. Но принцип относительности следует применять ко всем событиям внешнего мира. Не только законы механики, но и все законы природы должны быть одинаковы в системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.

С. Но как все законы природы могут оказаться одинаковыми в системах, движущихся друг относительно друга? Ведь, уравни-

ния поля, т. е. уравнения Максвелла, инвариантны относительно классического преобразования. Это ясно обнаруживается на примере скорости света. Согласно классическому преобразованию, эта скорость не была бы одинаковой в двух системах, движущихся друг относительно друга.

Н. Это только показывает, что классическое преобразование нельзя применять, что связь между двумя системами координат должна быть иной, и что мы не можем связывать координаты и скорости в разных системах координат так, как это сделано в этих законах преобразования. Мы должны заменить их новыми законами, выведя последние из основных положений теории относительности. Не будем заботиться о математическом выражении этих новых законов преобразования и удовлетворимся тем, что они отличны от классического. Мы назовем их кратко *преобразованиями Лоренца*. Можно показать, что уравнения Максвелла, т. е. законы поля, инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца, подобно тому, как законы механики инвариантны по отношению к классическим преобразованиям. Вспомним, как обстояло дело в классической физике. Мы имели законы преобразования для координат, законы преобразования для скоростей, но законы механики были одинаковы для обеих систем координат, движущихся прямолинейно и равномерно относительно друг друга. У нас были законы преобразования для пространства, но не для времени, потому что время было одинаково во всех системах координат. Однако здесь, в теории относительности, оно различно. Здесь мы имеем законы преобразования пространства, времени и скоростей, отличающиеся от классических законов. Но законы природы опять должны быть одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Законы природы должны быть инвариантны, но не по отношению к классическим преобразованиям, как прежде, а по отношению к новому типу преобразований — так называемым преобразованиям Лоренца. Во всех инерциальных системах справедливы те же самые законы, а переход от одной системы к другой дается преобразованиями Лоренца.

С. Я верю вам, но мне интересно было бы знать различие между преобразованиями классическими и преобразованиями Лоренца.

Н. Ответить на ваш вопрос лучше всего следующим образом. Сошлемся на некоторые характерные черты классических преобразований, и я постараюсь объяснить, сохраняются ли они в преобразованиях Лоренца, и если нет, то как они изменяются.

С. Если что-либо происходит в какой-то точке пространства в некоторый момент времени в моей системе координат, то наблюдатель, находящийся в другой системе координат, движущейся прямолинейно и равномерно относительно моей, отмечает другое число, определяющее положение места, где происходит событие,

но, конечно, то же самое время. Мы употребляем одни и те же часы во всех системах, независимо от того, движутся ли они или нет. Это и с вашей точки зрения справедливо?

Н. О, нет. Каждая система координат должна быть снабжена собственными часами, покоящимися в ней, так как движение изменяет ритм часов. Два наблюдателя, находящиеся в различных



Рис. 2.

системах координат, отмечают не только различные числа, определяющие положение, но и различные числа, определяющие время, в которое происходит это событие.

С. Это означает, что время не является больше инвариантом. В классических преобразованиях время всегда одно и то же во всех системах. В преобразованиях Лоренца оно изменяется и ведет

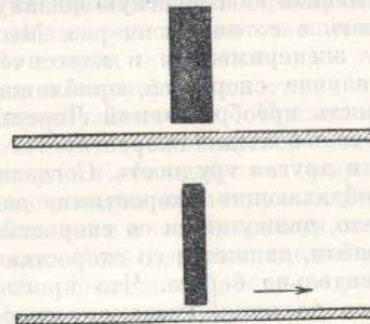


Рис. 3.

себя аналогично координате в старых преобразованиях. Интересно знать, как обстоит дело с длиной. Согласно классической механике, твердый стержень сохраняет свою длину как в движении, так и в покое. Верно ли это теперь?

Н. Неверно. В самом деле, из преобразований Лоренца следует, что движущийся стержень сокращается в направлении движения, и сокращение тем больше, чем больше скорость. Чем быстрее движется стержень, тем короче он оказывается. Но такое сокращение происходит только в направлении движения. На рис. 2 вы видите стержень, который сокращается до половины своей перво-

начальной длины, когда он движется со скоростью, приближающейся к 0,9 скорости света. Однако в направлении, перпендикулярном к движению, сокращения нет, что я и постарался проиллюстрировать на рис. 3.

С. Это означает, что ритм движущихся часов и длина движущихся стержней зависят от скорости. Но каким образом?

Н. Изменение становится более заметным по мере возрастания скорости. Из преобразований Лоренца следует, что стержень сократится до нуля, если его скорость достигнет скорости света. Аналогично этому ритм движущихся часов замедляется сравнительно с часами, мимо которых они проходят вдоль стержня; часы совершенно остановились бы, если бы они могли двигаться со скоростью света.

С. Это кажется противоречащим всему нашему опыту. Мы знаем, что вагон не становится короче, когда он в движении, и мы знаем также, что машинист всегда может сравнить свои «хорошие» часы с часами, мимо которых он проезжает, находя, что они хорошо согласованы друг с другом, вопреки вашему утверждению.

Н. Это, конечно, верно. Но все скорости в механике очень малы сравнительно со скоростью света, поэтому нелепо применять теорию относительности к этим явлениям. Каждый машинист может спокойно применять классическую физику, даже если он увеличит свою скорость в сотни тысяч раз. Мы могли бы ожидать несогласия между экспериментом и классическими преобразованиями только в случае скоростей, приближающихся к скорости света. Справедливость преобразований Лоренца может быть проверена лишь при очень больших скоростях.

С. Но имеется и другая трудность. Согласно механике, я могу вообразить тела, обладающие скоростями, даже большими, чем скорость света. Тело, движущееся со скоростью света относительно плывущего корабля, движется со скоростью, большей, чем скорость света, относительно берега. Что произойдет со стержнем, который сократился до нуля, когда его скорость сравнялась со скоростью света? Едва ли мы можем ожидать отрицательной длины, если скорость больше скорости света.

Н. В действительности нет никакого основания для такой проны! С точки зрения теории относительности материальные тела не могут иметь скорости, большей, чем скорость света. Скорость света образует верхний предел скоростей для всех материальных тел. Если скорость тела относительно корабля равна скорости света, то и относительно берега она тоже будет равна скорости света. Простой механический закон сложения и вычитания скоростей больше несправедлив или, более точно, справедлив лишь приближенно для малых скоростей, но не для скоростей, близких к скорости света. Число, выражающее скорость света, явно входит в преобразования Лоренца и играет роль предельного случая, по-

добно бесконечной скорости в классической механике. Эта более общая теория не противоречит классическим преобразованиям и классической механике. Наоборот, к старым понятиям мы возвращаемся, как к предельному случаю, когда скорости малы. С точки зрения новой теории ясно, в каких случаях справедлива классическая физика и где лежат ее пределы. Было бы нелепо применять теорию относительности к движению автомобилей, паровозов и поездов, как нелепо употреблять счетную машину там, где вполне достаточна таблица умножения.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ И МЕХАНИКА

Теория относительности необходимо возникает из серьезных и глубоких противоречий в старой теории, из которых, казалось, не было выхода. Сила новой теории заключается в согласованности и простоте, с которой она разрешает все эти трудности, используя лишь немногие очень убедительные предположения.

Хотя теория возникла из проблемы поля, она должна охватить все физические законы. Трудность, по-видимому, появляется здесь. Законы поля, с одной стороны, и законы механики, с другой, имеют совершенно различный характер. Уравнения электромагнитного поля инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца, а уравнения механики инвариантны по отношению к классическим преобразованиям. Но теория относительности требует, чтобы все законы природы были инвариантны по отношению к лоренцевым, а не классическим преобразованиям. Последние являются лишь специальным, предельным случаем преобразований Лоренца, когда относительные скорости обеих систем координат очень малы. Если это так, то классическую механику следует изменить, чтобы согласовать ее с требованием инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца. Или, другими словами, классическая механика не может быть справедливой, если скорости приближаются к скорости света. Переход от одной системы координат к другой может осуществляться только единственным путем — через преобразования Лоренца.

Классическую механику нетрудно было изменить так, чтобы она не противоречила ни теории относительности, ни изобилию материала, полученного наблюдением и объяснением классической механикой. Старая механика справедлива для малых скоростей и образует предельный случай новой механики.

Интересно рассмотреть какой-либо пример изменения в классической механике, которое вносит теория относительности. Возможно, это приведет нас к некоторым выводам, которые могут быть подтверждены или опровергнуты экспериментом.

Предположим, что тело, имеющее определенную массу, движется вдоль прямой и подвергается воздействию внешней силы,

действующей в направлении движения. Сила, как мы знаем, пропорциональна изменению скорости. Или, чтобы сказать яснее: не имеет значения, увеличивает ли данное тело свою скорость за одну секунду со 100 до 101 метра в секунду, или от 100 километров до 101 километров и одного метра в секунду, или от 300 000 километров до 300 001 километров и одного метра в секунду. Сила, необходимая для сообщения данному телу какого-либо определенного изменения скорости, всегда одна и та же.

Верно ли это положение с точки зрения теории относительности? Никоним образом! Этот закон справедлив только для малых скоростей. Каков же, по теории относительности, закон для больших скоростей, приближающихся к скорости света? Если скорость велика, то необходима чрезвычайно большая сила, чтобы увеличить ее. Вовсе не одно и то же — увеличить ли на один метр в секунду скорость, равную примерно 100 метрам в секунду, или же скорость, приближающуюся к световой. Чем ближе скорость к скорости света, тем труднее ее увеличить. Когда скорость равна скорости света, то уже невозможно увеличить ее дальше. Таким образом, то новое, что вносит теория относительности, не является удивительным. Скорость света есть верхний предел для всех скоростей. Никакая конечная сила, как бы велика она ни была, не может вызвать увеличения скорости сверх этого предела. На место старого закона механики, связывающего силу и изменение скорости, появляется более сложный закон. С нашей новой точки зрения классическая механика проста потому, что почти во всех наблюдениях мы имеем дело со скоростями, значительно меньшими, чем скорость света.

Покоящееся тело имеет определенную массу, так называемую *массу покоя*. Мы знаем из механики, что всякое тело сопротивляется изменению его движения; чем больше масса, тем сильнее сопротивление, и чем меньше масса, тем слабее сопротивление. Но в теории относительности мы имеем нечто большее. Тело сопротивляется изменению сильнее не только в случае, когда больше масса покоя, но и в случае, когда его скорость больше. Тела, скорости которых приближались бы к скорости света, оказывали бы очень сильное сопротивление внешним силам. В классической механике сопротивление данного тела есть всегда нечто неизменное, характеризующееся только его массой. В теории относительности оно зависит и от массы покоя, и от скорости. Сопротивление становится бесконечно большим по мере того, как скорость приближается к скорости света.

Только что указанные выводы позволяют нам подвергнуть теорию экспериментальной проверке. Оказывают ли снаряды, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света, сопротивление действию внешней силы так, как это предсказывает теория? Так как положения теории относительности имеют в этом отношении количественный характер, то мы могли бы подтвердить или опро-

вергнуть теорию, если бы мы обладали снарядами, движущимися со скоростями, близкими к скорости света.

На самом деле мы находим в природе снаряды, движущиеся с такими скоростями. Атомы радиоактивного вещества, например радия, действуют подобно батарее, которая стреляет снарядами, движущимися с огромными скоростями. Не входя в детали, мы можем указать только на один из самых важных взглядов современной физики и химии. Все вещество в мире построено из элементарных частиц, число разновидностей которых невелико. Подобно этому в одном городе здания различны по величине, конструкции и архитектуре, но на постройку всех их, от хижины до небоскреба, использованы кирпичи лишь очень немногих сортов, одинаковых во всех зданиях. Так, все известные химические элементы нашего материального мира — от легчайшего водорода до наиболее тяжелого урана — построены из одинакового рода кирпичей, т. е. из одинакового рода элементарных частиц. Наиболее тяжелые элементы — наиболее сложные построения — неустойчивы, и они распадаются или, как мы говорим, они радиоактивны. Некоторые кирпичи, т. е. элементарные частицы, из которых состоят радиоактивные атомы, выбрасываются иногда с очень большими скоростями, близкими к скорости света. Атом элемента, скажем радия, согласно нашим современным взглядам, подтверждаемым многочисленными экспериментами, обладает сложной структурой, и радиоактивный распад является одним из тех явлений, в которых выявляется, что атом построен из более простых кирпичей — элементарных частиц.

С помощью очень остроумных и сложных экспериментов мы можем обнаружить, как частицы сопротивляются действию внешней силы. Эксперименты показывают, что сопротивление, оказываемое этими частицами, зависит от скорости и как раз так, как это предсказывается теорией относительности. Во многих других случаях, где можно было обнаружить зависимость сопротивления от скорости, было установлено полное согласие между теорией относительности и экспериментом. Мы еще раз видим существенные черты творческой работы в науке: предсказание определенных фактов теорией и подтверждение их экспериментом.

Этот результат приводит к дальнейшему важному обобщению. Покоящееся тело имеет массу, но не имеет кинетической энергии, т. е. энергии движения. Движущееся тело имеет и массу, и кинетическую энергию. Оно сопротивляется изменению скорости сильнее, чем покоящееся тело. Кажется, что как будто кинетическая энергия движущегося тела увеличивает его сопротивление. Если два тела имеют одинаковую массу покоя, то тело с большей кинетической энергией сопротивляется действию внешней силы сильнее.

Представим себе ящик, наполненный шарами; пусть ящик и шары покоятся в нашей системе координат. Чтобы привести его в

движение, чтобы увеличить его скорость, требуется некоторая сила. Но будет ли эта сила производить то же самое увеличение скорости за тот же промежуток времени, если шары в ящике будут быстро двигаться по всем направлениям, подобно молекулам в газе, со средними скоростями, близкими к скорости света? Теперь необходима будет большая сила, так как возросшая кинетическая энергия шаров усиливает сопротивление ящика. Энергия, во всяком случае кинетическая энергия, сопротивляется движению так же, как и весовая масса. Справедливо ли это и в отношении всех видов энергии?

Теория относительности, исходя из своих основных положений, дает ясный и убедительный ответ на этот вопрос, ответ опять-таки количественного характера: всякая энергия сопротивляется изменению движения; всякая энергия ведет себя подобно веществу; кусок железа весит больше, когда он раскален докрасна, чем когда он холоден; излучение, испускаемое Солнцем и проходящее через пространство, содержит энергию и поэтому имеет массу; Солнце и все излучающие звезды теряют массу вследствие излучения. Это заключение, совершенно общее по своему характеру, является важным достижением теории относительности и соответствует всем фактам, которые привлекались для его проверки.

Классическая физика допускала две субстанции: вещество и энергию. Первое имело вес, а вторая была невесома. В классической физике мы имели два закона сохранения: один для вещества, другой для энергии. Мы уже ставили вопрос о том, сохраняет ли еще современная физика этот взгляд на две субстанции и два закона сохранения. Ответ таков: нет. Согласно теории относительности, нет существенного различия между массой и энергией. Энергия имеет массу, а масса представляет собой энергию. Вместо двух законов сохранения мы имеем только один: закон сохранения массы — энергии. Этот новый взгляд оказался очень плодотворным в дальнейшем развитии физики.

Как это случилось, что тот факт, что энергия обладает массой, а масса представляет собой энергию, столь долго оставался неизвестным? Весит ли кусок нагретого железа больше, чем кусок холодного? Теперь мы отвечаем «да», а раньше... отвечали «нет». Страницы, лежащие между этими двумя ответами, разумеется, не могут скрыть этого противоречия.

Трудности, стоящие здесь перед нами, того же порядка, какие встречались нам и прежде. Изменение массы, предсказанное теорией относительности, неизмеримо мало, его нельзя обнаружить прямым взвешиванием даже с помощью очень чувствительных весов. Доказательство того, что энергия не невесома, можно получить многими очень убедительными, но косвенными путями.

Причина этого недостатка непосредственной очевидности состоит в очень малой величине взаимобмена между веществом и энергией. Энергия по отношению к массе подобна обесцененной

валюте, взятой по отношению к валюте высокой ценности. Один пример сделает это ясным. Количество теплоты, способное превратить тридцать тысяч тонн воды в пар, весило бы около одного грамма. Энергия столь долго считалась невесома просто потому, что масса, которую она представляет, слишком мала.

Старая энергия-субстанция есть вторая жертва теории относительности. Первой была среда, в которой распространялись световые волны.

Влияние теории относительности выходит далеко за пределы тех проблем, из которых она возникла. Она снимает трудности и противоречия теории поля; она формулирует более общие механические законы; она заменяет два закона сохранения одним; она изменяет наше классическое понятие абсолютного времени. Ее ценность не ограничивается лишь сферой физики; она образует общий остов, охватывающий все явления природы.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ КONTИНУУМ

«Французская революция началась в Париже 14 июля 1789 года». В этом предложении установлены место и время события. Тому, кто слышит это утверждение впервые и кто не знает, что значит «Париж», можно было бы сказать: это — город на нашей Земле, расположенный на 2° восточной долготы и 49° северной широты. Два числа характеризовали бы тогда место, а «14 июля 1789 года» — время, в которое произошло событие. В физике точная характеристика, когда и где произошло событие, чрезвычайно важна, гораздо важнее, чем в истории, так как эти числа образуют основу количественного описания.

Ради простоты мы рассматривали прежде только движение вдоль прямой. Нашей координатной системой был твердый стержень с началом, но без конца. Сохраним это ограничение. Отметим на стержне различные точки; положение каждой из них может быть охарактеризовано только одним числом — координатой точки. Сказать, что координата точки равна 7,586 метра, означает, что ее расстояние от начала стержня равно 7,586 метра. Наоборот, если кто-то задает мне любое число и единицу измерения, я всегда могу найти точку на стержне, соответствующую этому числу. Мы видим, что каждому числу соответствует определенная точка на стержне, а каждой точке соответствует определенное число. Этот факт выражается математиками в следующем предложении: *все точки стержня образуют одномерный континуум*. Тогда существует точка, сколь угодно близкая к данной точке стержня. Мы можем связать две отдаленные точки на стержне рядом отрезков, расположенных один за другим, каждый из которых сколь угодно мал. Таким образом, тот факт, что отрезки, связывающие отдаленные точки, произвольно малы, является характеристикой континуума.

Возьмем другой пример. Пусть мы имеем плоскость или, если вы предпочитаете что-либо более конкретное, поверхность прямоугольного стола (рис. 4). Положение точки на этом столе можно охарактеризовать двумя числами, а не одним, как раньше. Два числа суть расстояния от двух перпендикулярных краев стола.

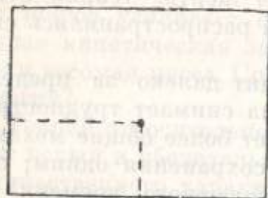


Рис. 4.

Не одно число, а пара чисел соответствует каждой точке плоскости; каждой паре чисел соответствует определенная точка. Другими словами: *плоскость есть двумерный континуум*. Тогда существуют точки, сколь угодно близкие к данной точке плоскости. Две отдаленные точки могут быть связаны кривой, разделенной на отрезки, сколь угодно малые. Таким образом, произвольная малость отрезков, последовательно укла-

дывающихся на кривой, связывающей две отдаленные точки, каждая из которых может быть определена двумя числами, снова является характеристикой двумерного континуума.

Еще один пример. Представим себе, что вы хотите в качестве системы координат рассматривать свою комнату. Это означает, что вы хотите любое положение тела определить относительно стен комнаты. Положение кончика лампы, если она в покое, может быть описано тремя числами: два из них определяют расстояние от двух перпендикулярных стен, а третье — расстояние

Время в секундах	Высота над землей в метрах	Время в секундах	Высота над землей в метрах
0	80	3	35
1	75	4	0
2	60		

от пола или потолка. Каждой точке пространства соответствуют три определенных числа; каждым трем числам соответствует определенная точка в пространстве (рис. 5). Это выражается предложением: *наше пространство есть трехмерный континуум*. Существуют точки, весьма близкие к каждой данной точке пространства. И опять произвольная малость отрезков линии, связывающей отдаленные точки, каждая из которых представлена тремя числами, есть характеристика трехмерного континуума.

Но все это едва ли физика. Чтобы вернуться к физике, нужно рассмотреть движение материальных частиц. Чтобы исследовать и предсказывать явления в природе, необходимо рассматривать не

только место, но и время физических событий. Возьмем снова очень простой пример.

Маленький камешек, который примем за частицу, падает с башни. Допустим, что высота башни равна 80 метрам. Со времени Галилея мы в состоянии предсказать координаты камня в произвольный момент времени после начала его падения. На стр. 290 представлена «временная таблица», приближенно описывающая положение камня после 1, 2, 3 и 4 секунд.

В нашей «временной таблице» зарегистрированы пять событий, каждое из которых представлено двумя числами — временем и пространственной координатой каждого события. Первое событие есть начало движения камня с высоты 80 метров от земли в момент, равный нулю. Второе событие есть совпадение камня с нашим твердым стержнем (башней) на высоте 75 метров от земли. Это имеет место по истечении одной секунды. Последнее событие есть удар камня о землю.

Те сведения, которые записаны во «временной таблице», можно было бы представить иначе. Пять пар чисел ее можно было бы представить как пять точек на плоскости. Установим сначала масштаб. Например: пусть один отрезок будет представлять метр, а другой секунду (рис. 6).

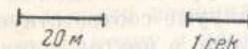


Рис. 6.

Затем нарисуем две перпендикулярные линии, одну из них, скажем горизонтальную, назовем временной осью, вертикальную же — пространственной осью. Мы сразу же видим, что нашу «временную таблицу» можно представить пятью точками в пространственно-временной плоскости (рис. 7).

Расстояния точек от пространственной оси представляют собой координаты времени, указанные в первой колонке «временной таблицы», а расстояния от оси времен — их пространственные координаты.

Одна и та же связь выражена двумя способами: с помощью «временной таблицы» и точками на плоскости. Одно может быть построено из другого. Выбор между этими двумя представлениями является делом лишь вкуса, ибо в действительности они оба эквивалентны.

Сделаем теперь еще один шаг. Представим себе улучшенную «временную таблицу», дающую положения не для каждой секунды, а, скажем, для каждой сотой или тысячной секунды. Тогда у нас будет много точек в нашей пространственно-временной плоскости. Наконец, если положение дается для каждого мгновения,

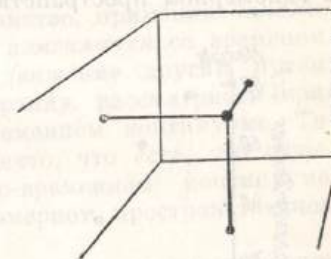


Рис. 5.

или, как говорят математики, если пространственная координата дается как функция времени, то совокупность точек становится непрерывной линией. Поэтому наш следующий рисунок дает не отрывочные сведения, как прежде, а полное представление о движении камня.

Движение вдоль твердого стержня (башни), т. е. движение в одномерном пространстве, представлено здесь в виде кривой и

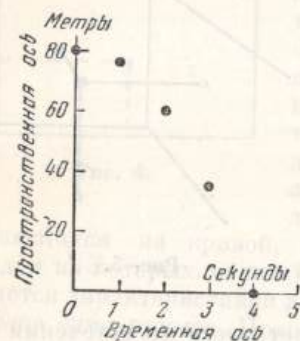


Рис. 7.

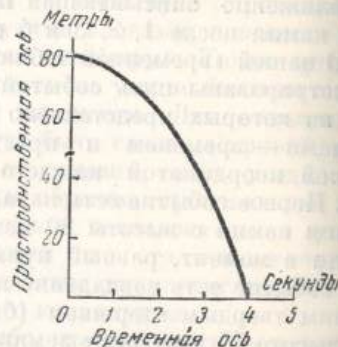


Рис. 8.

двухмерном пространственно-временном континууме. Каждой точке в нашем пространственно-временном континууме соответствует пара чисел, одно из которых отмечает времени, а другое — пространственную координату. Наоборот: определенная точка в нашем пространственно-временном континууме соответствует некоторой паре чисел, характеризующей событие. Две соседние точки представляют собой два события, прошедшие в местах, близких друг от друга, и в моменты времени, непосредственно следующие друг за другом.

Вы могли бы возразить против нашего способа представления следующим образом: мало смысла в представлении единицы времени отрезком, в его механическом соединении с пространством, образующим двухмерный континуум из двух одномерных континуумов. Но тогда вы должны были бы столь же серьезно протестовать против всех графиков, представляющих, например, изменение температуры в Нью-Йорке в течение последнего лета, или против графиков, изображающих изменение стоимости жизни за последние несколько лет, так как в каждом из этих случаев употребляется тот же самый метод. В температурных графиках одномерный температурный континуум соединяется с одномерным временным континуумом в двухмерный температурно-временной континуум.

Вернемся к частице, падающей с 80-метровой башни. Наша графическая картина движения есть полезное соглашение, так как

она позволяет нам характеризовать положение частицы в любой произвольный момент времени. Зная, как движется частица, мы хотели бы изобразить ее движение еще раз. Сделать это можно двумя путями.

Вспомним изображение частиц, изменяющих свое положение со временем в одномерном пространстве. Мы изображаем движение как ряд событий в одномерном пространственном континууме. Мы не смешиваем время и пространство, применяя динамическую картину, в которой положения изменяются со временем.

Но можно изобразить то же самое движение другим путем. Мы можем образовать статическую картину, рассматривая кривую в двухмерном пространственно-временном континууме. Теперь движение рассматривается как нечто, что есть, что существует в двухмерном пространственно-временном континууме, а не как нечто, изменяющееся в одномерном пространственном континууме.

Обе эти картины совершенно равноценны, и предпочтение одной из них перед другой есть дело лишь соглашения и вкуса.

То, что здесь сказано о двух картинах движения, не имеет отношения к теории относительности. Оба представления могут быть использованы с одинаковым правом, хотя классическая теория скорее предпочитала динамическую картину описания движения, как того, что происходит в пространстве, статической картине, описывающей его в пространстве-времени. Но теория относительности изменила этот взгляд. Она явно предпочла статическую картину и нашла в этом представлении движения, как того, что существует в пространстве-времени, более удобную и более объективную картину реальности. Мы должны еще ответить на вопрос, почему эти две картины эквивалентны с точки зрения классической физики и не эквивалентны с точки зрения теории относительности. Ответ будет понятным, если снова рассмотреть две системы координат, движущиеся прямолинейно и равномерно друг относительно друга.

Согласно классической физике, наблюдатели в обеих системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, найдут для одного и того же события различные пространственные координаты, но одну и ту же временную координату. Таким образом, в нашем примере удар камня о землю характеризуется при нашем выборе системы координат временной координатой «4» и пространственной координатой «0». Согласно классической механике, наблюдатели, движущиеся прямолинейно и равномерно относительно выбранной системы координат, обнаружат, что камень достигнет земли спустя четыре секунды после начала падения. Но каждый из наблюдателей относит расстояние к своей системе координат, и они будут, вообще говоря, связывать различные пространственные координаты с событием соударения, хотя временная координата будет одной и той же для всех

других наблюдателей, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Классическая физика знает только «абсолютное» время, текущее одинаково для всех наблюдателей. Для каждой системы координат двухмерный континуум может быть разбит на два одномерных континуума: время и пространство. Благодаря «абсолютному» характеру времени переход от «статики» к «динамической» картине движения имеет в классической физике объективный смысл.

Но мы уже убедились в том, что классические преобразования не могут применяться в физике в общем случае. С практической точки зрения они еще пригодны для малых скоростей, но не годятся для обоснования фундаментальных физических вопросов.

Согласно теории относительности, момент соударения камня с землей не будет одним и тем же для всех наблюдателей. И временная координата, и пространственная координата будут различными в двух различных системах координат, и изменение временной координаты будет весьма заметным, если относительная скорость систем приближается к скорости света. Двухмерный континуум не может быть разбит на два одномерных континуума, как в классической физике. Мы не можем рассматривать пространство и время раздельно при определении пространственно-временных координат в другой системе координат. Разделение двухмерного континуума на два одномерных оказывается, с точки зрения теории относительности, произвольным процессом, не имеющим объективного смысла.

Все, что мы только что сказали, нетрудно обобщить для случая движения, не ограниченного прямой линией. В самом деле, для описания событий в природе нужно применить не два, а четыре числа. Физическое пространство, постигаемое через объекты и их движения, имеет три измерения, и положения объектов характеризуются тремя числами. Момент события есть четвертое число. Каждому событию соответствует четыре определенных числа; каким-либо четырем числам соответствует определенное событие. Поэтому: мир событий образует *четырёхмерный континуум*. В этом нет ничего мистического, и последнее предложение одинаково справедливо и для классической физики, и для теории относительности. И опять различие обнаруживается лишь тогда, когда рассматриваются две системы координат, движущиеся друг относительно друга. Пусть движется комната, а наблюдатели внутри и вне ее определяют пространственно-временные координаты одних и тех же событий. Сторонник классической физики разобьет четырехмерный континуум на трехмерное пространство и одномерный временной континуум. Старый физик заботится только о преобразовании пространства, так как время для него абсолютно. Он находит разбиение четырехмерного мирового континуума на пространство и время естественным и удобным. Но

с точки зрения теории относительности время, так же как и пространство, изменяется при переходе от одной системы координат к другой, и преобразования Лоренца рассматривают трансформационные свойства четырехмерного пространственно-временного континуума — нашего четырехмерного мира событий.

Мир событий может быть описан динамически с помощью картины, изменяющейся во времени и набросанной на фоне трехмерного пространства. Но он может быть также описан посредством статической картины, набросанной на фоне четырехмерного пространственно-временного континуума. С точки зрения классической физики обе картины, динамическая и статическая, — равноценны. Но с точки зрения теории относительности статическая картина более удобна и более объективна.

Даже в теории относительности мы можем еще употреблять динамическую картину, если мы ее предпочитаем. Но мы должны помнить, что это деление на время и пространство не имеет объективного смысла, так как время больше не является «абсолютным». Дальше мы еще будем пользоваться «динамическим», а не «статическим» языком, но при этом всегда будем учитывать его ограниченность.

ОБЩАЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ

Остается выяснить еще один момент. Пока еще не решен один из наиболее фундаментальных вопросов: существует ли инерциальная система? Мы узнали кое-что о законах природы, их инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца и их справедливости во всех инерциальных системах, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Мы имеем законы, но не знаем того «тела отсчета», к которому следует их отнести.

Для того чтобы больше знать об этих трудностях, побеседуем с физиком, стоящим на позиции классической физики, и зададим ему несколько простых вопросов.

— «Что такое инерциальная система?»

— «Это система координат, в которой справедливы законы механики. Тело, на которое не действуют внешние силы, движется в такой системе прямолинейно и равномерно. Это свойство позволяет нам, следовательно, отличить инерциальную систему координат от всякой другой».

— «Но что значит, что на тело не действуют никакие внешние силы?»

— «Это просто значит, что тело движется прямолинейно и равномерно в инерциальной системе координат».

Здесь вы могли бы еще раз поставить вопрос: «Что же такое инерциальная система координат?» Но, поскольку имеется мало

надежд получить ответ, отличный от вышеприведенного, поставимся добиться конкретной информации, изменив вопрос:

— «Является ли система, жестко связанная с Землей, инерциальной?»

— «Нет, потому что законы механики не являются строго справедливыми на Земле, благодаря ее вращению. Систему координат, жестко связанную с Солнцем, можно считать инерциальной при решении многих проблем; но, когда мы говорим о вращении Солнца, мы снова заключаем, что жестко связанную с ним систему координат нельзя считать строго инерциальной».

— «Тогда, что конкретно является вашей инерциальной системой координат и как следует выбрать состояние ее движения?»

— «Это только полезная фикция, и у меня нет никакого представления о том, как ее реализовать. Если бы только я мог изолироваться от всех материальных тел и освободиться от всех внешних влияний, то моя система координат была бы инерциальной».

— «Но что вы имеете в виду, говоря о системе координат, свободной от всех внешних влияний?»

— «Я имею в виду, что система координат инерциальна». — Мы вновь вернулись к нашему первоначальному вопросу!

Наша беседа обнаруживает серьезную трудность в классической физике. Мы имеем законы, но не знаем, каково то тело отсчета, к которому следует их отнести, и все наше физическое построение оказывается возведенным на песок.

Мы можем подойти к той же трудности с другой точки зрения. Постараемся представить себе, что во всей Вселенной существует только одно тело, образующее нашу систему координат. Это тело начинает вращаться. Согласно классической механике, физические законы для вращающегося тела отличны от законов для невращающегося тела. Если принцип инерции справедлив в одном случае, то он несправедлив в другом. Но все это звучит очень сомнительно. Позволительно ли рассматривать движение лишь одного тела во всей Вселенной? Под движением тела мы всегда разумеем изменение его положения относительно другого тела. Поэтому говорить о движении одного-единственного тела значит противоречить здравому смыслу. Классическая механика и здравый смысл сильно расходятся в этом пункте. Рецепт Ньютона таков: если принцип инерции имеет силу, то система координат либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно. Если принцип инерции не имеет силы, то тело не находится в прямолинейном и равномерном движении. Таким образом, наш вывод о движении или покое зависит от того, применимы или нет все физические законы к данной системе координат.

Возьмем два тела, например Солнце и Землю. Движение, которое мы наблюдаем, опять *относительное*. Его можно описать с помощью системы координат, связанной либо с Землей, либо

с Солнцем. С этой точки зрения великое достижение Коперника состоит в переносе системы координат с Земли на Солнце. Но поскольку движение относительно и можно применить любое тело отсчета, то оказывается, что нет никаких оснований для того, чтобы предпочесть одну систему координат другой.

Снова вмешивается физика и изменяет нашу общепринятую точку зрения. Система координат, связанная с Солнцем, имеет с инерциальной системой большее сходство, чем система, связанная с Землей. Физические законы предпочтительнее применять в системе Коперника, чем в системе Птолемея. Величие открытия Коперника может быть высоко оценено лишь с физической точки зрения. Физика показывает, что для описания движения планет система координат, жестко связанная с Солнцем, имеет огромные преимущества.

В классической физике нет никакого абсолютного прямолинейного и равномерного движения. Если две системы координат движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга, то нет никаких оснований говорить: «Эта система покоится, а другая движется». Но если обе системы координат находятся в непрямолинейном и неравномерном движении друг относительно друга, то имеется полное основание сказать: «Это тело движется, а другое покоится (или движется прямолинейно и равномерно)». Абсолютное движение имеет здесь вполне определенный смысл. В этом месте между здравым смыслом и классической физикой имеется широкая пропасть. Упомянутые трудности, касающиеся инерциальной системы, а также и трудности, касающиеся абсолютного движения, тесно связаны между собой. Абсолютное движение становится возможным только благодаря идее об инерциальной системе, для которой справедливы законы природы.

Может показаться, что будто бы нет выхода из этих трудностей, что будто бы никакая физическая теория не может избежать их. Источник их лежит в том, что законы природы справедливы только для особого класса систем координат, а именно: для инерциальных. Возможность разрешения этих трудностей зависит от ответа на следующий вопрос. Можем ли мы сформулировать физические законы таким образом, чтобы они были справедливыми для всех систем координат, т. е. не только для систем, движущихся прямолинейно и равномерно, но и для систем, движущихся совершенно произвольно по отношению друг к другу? Если это можно сделать, то наши трудности будут разрешены. Тогда мы будем в состоянии применять законы природы в любой системе координат. Борьба между воззрениями Птолемея и Коперника, столь жестокая в ранние дни науки, стала бы тогда совершенно бессмысленной. Любая система координат могла бы применяться с одинаковым основанием. Два предложения — «Солнце покоится, а Земля движется» и «Солнце движется, а Земля по-

коится» — означали бы просто два различных соглашения о двух различных системах координат.

Могли ли бы мы построить реальную релятивистскую физику, справедливую во всех системах координат; физику, в которой имело бы место не абсолютное, а лишь относительное движение? Это в самом деле оказывается возможным!

У нас есть по крайней мере одно, хотя и очень слабое, указание о том, как построить новую физику. Действительно, релятивистская физика должна применяться во всех системах координат, а стало быть, и в специальном случае — в инерциальной системе. Мы уже знаем законы для этой инерциальной системы координат. Новые общие законы, справедливые для всех систем координат, должны в специальном случае инерциальной системы сводиться к старым, известным законам.

Проблема формулирования физических законов для всякой системы координат была разрешена так называемой *общей теорией относительности*; предыдущая теория, применяемая только к инерциальным системам, называется *специальной теорией относительности*. Эти две теории не могут, разумеется, противоречить друг другу, так как мы всегда должны включать установленные ранее законы специальной теории относительности в общие законы для случая неинерциальной системы. Но если раньше инерциальная система координат была единственной, для которой были сформулированы физические законы, то теперь она представит особый предельный случай, поскольку допустимы любые системы координат, движущиеся произвольно по отношению друг к другу.

Такова программа общей теории относительности. Но, обрисовывая путь, каким она создавалась, мы должны быть еще менее конкретными, чем это было до сих пор. Новые трудности, возникающие в процессе развития науки, вынуждают нашу теорию становиться все более и более абстрактной. Нас ожидает еще ряд неожиданностей. Но наша постоянная конечная цель — все лучшее и лучшее понимание реальности. К логической цепи, связывающей теорию и наблюдение, прибавляются новые звенья. Чтобы очистить путь, ведущий от теории к эксперименту, от ненужных и искусственных допущений, чтобы охватить все более обширную область фактов, мы должны делать цепь все длиннее и длиннее. Чем проще и фундаментальнее становятся наши допущения, тем сложнее математическое оружие нашего рассуждения; путь от теории к наблюдению становится длиннее, тоньше и сложнее. Хотя это и звучит парадоксально, но мы можем сказать: современная физика проще, чем старая физика, и поэтому она кажется более трудной и запутанной. Чем проще наша картина внешнего мира и чем больше фактов она охватывает, тем резче отражает она в наших умах гармонию Вселенной.

Наша новая идея проста: построить физику, справедливую для всех систем координат. Осуществление этой идеи приносит фор-

мальное усложнение и вынуждает нас использовать математические методы, отличные от тех, которые до сих пор применялись в физике. Мы покажем здесь только связь между осуществлением этой программы и двумя принципиальными проблемами: тяготением и геометрией.

ВНЕ И ВНУТРИ ЛИФТА

Закон инерции является первым большим успехом в физике, фактически ее действительным началом. Он был получен размышлением об идеализированном эксперименте, о теле, постоянно движущемся без трения и без воздействия каких-либо других внешних сил. Из этого примера, а позднее из многих других, мы узнали о важности идеализированного эксперимента, созданного мышлением. Здесь тоже будут обсуждаться идеализированные эксперименты. Хотя они и могут выглядеть весьма фантастично, тем не менее они помогут нам понять в относительности столько, сколько это возможно с помощью наших простых методов.

Раньше у нас был идеализированный эксперимент с прямолинейно и равномерно движущейся комнатой. Здесь мы будем иметь дело с падающим лифтом.

Представим себе огромный лифт на башне небоскреба, гораздо более высокого, чем какой-либо из действительно построенных. Внезапно канат, поддерживающий лифт, обрывается, и лифт свободно падает по направлению к земле. Во время падения наблюдатели в лифте производят опыты. Описывая их, мы можем не заботиться о сопротивлении воздуха или трении, потому что в наших идеализированных условиях можно пренебречь их наличием. Один из наблюдателей вынимает платок и часы из своего кармана и выпускает их из рук. Что происходит с этими предметами? Для внешнего наблюдателя, который смотрит через окно лифта, и платок, и часы падают по направлению к земле с одинаковым ускорением. Мы помним, что ускорение падающих тел совершенно независимо от их масс, и это было тем фактом, который обнаружил равенство тяжелой и инертной масс. Мы помним также, что равенство двух масс — тяжелой и инертной — с точки зрения классической механики было совершенно случайным фактом и не играло никакой роли в ее структуре. Однако здесь это равенство, отраженное в равенстве ускорения всех падающих тел, существенно и составляет основу всех наших рассуждений.

Вернемся к падающему платку и часам; для внешнего наблюдателя оба предмета падают с одинаковым ускорением. Но таково же ускорение и лифта, его стен, пола и потолка. Поэтому расстояние между обоими телами и полом не изменится. Для внутреннего наблюдателя оба тела остаются точно там же, где они были в тот момент, когда наблюдатель выпустил их из рук. Вну-

тренний наблюдатель может игнорировать поле тяготения, так как источник последнего лежит вне его системы координат. Он находит, что никакие силы внутри лифта не действуют на оба тела и, таким образом, они остаются в покое, как если бы они находились в инерциальной системе. Странные вещи происходят в лифте! Если наблюдатель толкает тело в каком-либо направлении и равномерно, пока не столкнется с потолком или полом лифта. Короче говоря, законы классической механики справедливы для наблюдателя внутри лифта. Все тела ведут себя так, как следовало ожидать по закону инерции. Наша новая система координат, жестко связанная со свободно падающим лифтом, отличается от инерциальной системы лишь в одном отношении. В инерциальной системе координат движущееся тело, на которое не действуют никакие силы, будет вечно двигаться прямолинейно и равномерно. Инерциальная система координат, рассматриваемая в классической физике, не ограничена ни в пространстве, ни во времени. Однако рассматриваемый случай с наблюдателем, находящимся в лифте, иной. Инерциальный характер его системы координат ограничен в пространстве и времени. Рано или поздно прямолинейно и равномерно движущееся тело столкнется со стенками лифта; при этом прямолинейное и равномерное движение нарушится. Рано или поздно весь лифт столкнется с землей, уничтожив наблюдателей и их опыты. Эта система координат является лишь «карманным изданием» реальной инерциальной системы.

Этот локальный характер системы координат весьма существен. Если бы наш воображаемый лифт достигал размеров от Северного полюса до экватора и платок был бы помещен на Северном полюсе, а часы на экваторе, то для внешнего наблюдателя оба тела не имели бы одинакового ускорения; они не были бы в покое друг относительно друга. Все наши рассуждения потерпели бы крушение! Размеры лифта должны быть ограничены так, чтобы можно было предположить равенство ускорений всех тел по отношению к внешнему наблюдателю.

С этим ограничением система координат, связанная с падающим лифтом, инерциальна для внутреннего наблюдателя. По крайней мере мы можем указать систему координат, в которой справедливы все физические законы, хотя она и ограничена во времени и пространстве. Если мы вообразим другую систему координат, другой лифт, движущийся прямолинейно и равномерно относительно свободно падающего, то обе эти системы координат будут локально инерциальными. Все законы совершенно одинаковы в обеих системах. Переход от одной системы к другой дается преобразованием Лоренца.

Посмотрим, каким путем оба наблюдателя, внешний и внутренний, описывают то, что происходит в лифте.

Внешний наблюдатель замечает движение лифта и всех тел в нем и находит его соответствующим закону тяготения Ньютона. Для него движение является не равномерным, а ускоренным, вследствие действия поля тяготения Земли.

Однако поколение физиков, рожденное и воспитанное в лифте, рассуждало бы совершенно иначе. Оно было бы уверено в том, что оно обладает инерциальной системой, и относилось бы все законы природы к своему лифту, заявляя с уверенностью, что законы принимают особенно простую форму в их системе координат. Для них было бы естественным считать свой лифт покоящимся и свою систему координат инерциальной.

Невозможно установить принципиальное различие между внешним и внутренним наблюдателем. Каждый из них мог бы претендовать на право отнести все события к своей системе координат. Оба описания событий можно было бы сделать одинаково последовательными.

Из этого примера мы видим, что последовательное описание физических явлений в двух различных системах координат возможно, даже если они не движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Но для такого описания мы должны принять во внимание тяготение, создающее, так сказать, «мост», позволяющий перейти от одной системы координат к другой. Поле тяготения существует для внешнего наблюдателя, для внутреннего наблюдателя оно не существует. Ускоренное движение лифта в поле тяготения существует для внешнего наблюдателя, для внутреннего же наблюдателя — покой и отсутствие поля тяготения. Но «мост», т. е. поле тяготения, делающее описание в обеих системах координат возможным, покоится на одной очень важной опоре: эквивалентности тяжелой и инертной массы. Без этой руководящей идеи, оставшейся незамеченной в классической механике, наши теперешние рассуждения полностью отпали бы.

Возьмем несколько иной, идеализированный эксперимент. Пусть имеется инерциальная система координат, в которой справедлив закон инерции. Мы уже описывали то, что происходит в лифте, покоящемся в такой инерциальной системе. Но теперь мы изменим картину.

Кто-то извне привязал к лифту канат и тянет его с постоянной силой в направлении, указанном на рис. 9. Неважно, как это осуществлено. Так как законы механики справедливы в этой системе координат, то лифт в целом движется с постоянным ускорением в направлении движения. Будем опять слушать объяснения явлений, происходящих в лифте, даваемые внешним и внутренним наблюдателями.

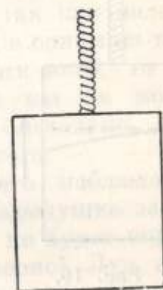


Рис. 9.

Внешний наблюдатель. Моя система координат инерциальна. Лифт движется с постоянным ускорением, потому что подвергается воздействию постоянной силы. Наблюдатели внутри лифта находятся в абсолютном движении, для них законы механики несправедливы. Они не находят, что тела, на которые не действуют силы, покоятся. Если тело остается свободным, оно скоро столкнется с полом лифта, так как пол движется вверх по направлению к телу. Это происходит одинаково и с часами, и с платком. Мне кажется очень странным, что наблюдатель внутри лифта должен всегда быть на «полу», потому что, как только он прыгает, пол достигает его вновь.

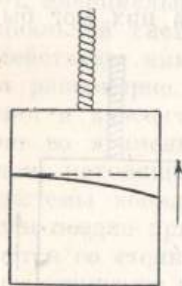


Рис. 10.

Внутренний наблюдатель. Я не вижу какого-либо основания считать, что мой лифт находится в абсолютном движении. Я согласен, что моя система координат, жестко связанная с лифтом, фактически не инерциальна, но я не думаю, что это имеет какое-то отношение к абсолютному движению. Мои часы, платок и все тела падают потому, что лифт в целом находится в поле тяготения. Я замечаю движение точно такого же рода, как и человек на Земле. Он объясняет его очень просто — действием поля тяготения. Такое же объяснение подходит и для меня.

Эти два описания — одно, данное внешним, а другое — внутренним наблюдателем, — вполне последовательны, и нет возможности решить, какое из них правильно. Мы можем принять любое из них для описания явлений в лифте: либо вместе с внешним наблюдателем принять неравномерность движения и отсутствие поля тяготения, либо вместе с внутренним наблюдателем принять покой и наличие поля тяготения.

Внешний наблюдатель может предположить, что лифт находится в «абсолютном» неравномерном движении. Но движение, которое уничтожается предположением о действии поля тяготения, не может считаться абсолютным.

Возможно, что имеется выход из неопределенности, созданной наличием двух различных описаний, и, может быть, можно было бы вынести решение в пользу одного и против другого. Представим себе, что световой луч входит в лифт горизонтально через боковое окно и спустя очень короткое время достигает противоположной стены. Посмотрим, каковы будут предсказания обоих наблюдателей относительно пути луча.

Внешний наблюдатель, который считает, что лифт находится в ускоренном движении, утверждал бы: световой луч входит в окно и движется горизонтально вдоль прямой с постоянной скоростью по направлению к противоположной стене. Но лифт движется вверх, и за время, в течение которого свет доходит к стене,

лифт изменит свое положение. Поэтому свет упадет в точку, расположенную не точно напротив точки его входа, а немного ниже (рис. 10). Смещение будет очень небольшим, но тем не менее оно существует, и световой луч проходит относительно лифта не вдоль прямой, а вдоль слабо искривленной линии. Это вызвано тем, что за то время, когда луч пересекает внутренность лифта, сам лифт смещается на некоторое расстояние.

Внутренний наблюдатель, который считает, что на все объекты в лифте действует поле тяготения, сказал бы: ускоренного движения лифта нет, а есть лишь действие поля тяготения. Луч света невесом и потому не будет подвергаться действию поля тяготения. Если его направить горизонтально, он упадет на стену в точке как раз напротив той, в которую он вошел.

Из этого обсуждения следует, что имеется возможность выбора одной из двух противоположных точек зрения, так как явление различалось бы для обоих наблюдателей. Если ни в одном из только что указанных объяснений нет ничего нелогичного, то все наши предыдущие рассуждения нарушаются и мы не можем последовательно описывать все явления двумя методами, либо принимая поле тяготения, либо отказываясь от него.

Но, к счастью, в рассуждениях внутреннего наблюдателя имеется серьезная ошибка, спасающая наши предыдущие заключения. Он сказал: «Луч света невесом и потому не будет подвергаться действию поля тяготения». Но это неверно! Луч света несет энергию, а энергия имеет массу. Но на всякую инертную массу поле тяготения оказывает воздействие, так как инертная и тяжелая массы эквивалентны. Луч света будет искривляться в поле тяготения точно так же, как искривляется траектория тела, брошенного горизонтально со скоростью, равной скорости света. Если бы внутренний наблюдатель рассуждал строго и принял бы во внимание искривление световых лучей в поле тяготения, то его выводы были бы точно такими же, как и выводы внешнего наблюдателя.

Поле тяготения Земли, конечно, очень слабо для того, чтобы искривление светового луча в нем можно было обнаружить непосредственно экспериментом. Но известные опыты, продланные во время солнечных затмений, убедительно, хотя и косвенно, показывают влияние поля тяготения на путь светового луча.

Из этих примеров следует, что имеется вполне обоснованная надежда сформулировать релятивистскую физику. Но для этого мы должны сначала разрешить проблему тяготения.

Мы видели на примере с лифтом последовательность двух описаний. Можно предположить наличие неравномерности движения, а можно этого не делать. Мы можем исключить из наших примеров «абсолютное» движение с помощью поля тяготения. Но тогда в неравномерном движении нет ничего абсолютного. Поле тяготения в состоянии полностью его уничтожить.

Призраки абсолютного движения и инерциальной системы координат могут быть исключены из физики, и может быть построена новая релятивистская физика. Наши идеализированные опыты показывают, как тесно связана проблема общей теории относительности с проблемой тяготения и почему эквивалентность тяжелой и инертной масс так существенна для этой связи. Ясно, что решение проблемы тяготения в общей теории относительности должно отличаться от ньютоновского. Законы тяготения, так же как и все законы природы, должны быть сформулированы для всех возможных систем координат, в то время как законы классической механики, сформулированные Ньютоном, справедливы лишь в инерциальных системах координат.

ГЕОМЕТРИЯ И ОПЫТ

Наш следующий пример будет более фантастичным, чем пример с падающим лифтом. Мы должны подойти к новой проблеме, проблеме связи между общей теорией относительности и геометрией. Начнем с описания мира, в котором живут лишь двумерные, а не трехмерные существа, как в нашем. Кинематограф приучил нас к двумерным существам, действующим на двумерном экране. Представим себе теперь, что эти теневые фигуры, действующие на экране, действительно существуют, что они обладают способностью мышления, что они могут создавать свою собственную науку, что для них двумерный экран олицетворяет геометрическое пространство. Эти существа не в состоянии представить себе наглядным образом трехмерное пространство, так же, как мы не в состоянии представить мир четырех измерений. Они могут изогнуть прямую линию; они знают, что такое круг, но они не в состоянии построить сферу, потому что это означало бы покинуть их двумерный экран. Мы находимся в таком же положении. Мы в состоянии изогнуть и линии, и поверхности, но мы с трудом можем представить искривленное пространство.

Живя, мысля и экспериментируя, наши теневые фигуры могли бы, возможно, овладеть знанием двумерной эвклидовой геометрии. Таким образом, они могли бы доказать, что сумма углов в треугольнике равна 180 градусам. Они могли бы построить два круга с общим центром, один очень малый, а другой большой. Они нашли бы, что отношение длин окружностей двух таких кругов равно отношению их радиусов — результат, опять характерный для эвклидовой геометрии. Если бы экран был бесконечно велик, то наши теневые существа нашли бы, что, отправившись однажды в путешествие вперед по прямой, они никогда не вернутся к своей отправной точке.

Представим себе теперь, что эти двумерные существа живут в измененных условиях. Предположим, что кто-то извне, из «треть-

его измерения» перенес их с экрана на поверхность сферы с очень большим радиусом. Если эти тени очень малы по отношению ко всей поверхности, если у них нет средств дальнего сообщения и они не могут двигаться очень далеко, то они не обнаружат какого-либо изменения. Сумма углов в малых треугольниках еще составляет 180 градусов. Отношение радиусов двух малых кругов с общим центром еще равно отношению длин их окружностей.

Но пусть эти теневые существа с течением времени развивают свои теоретические и технические познания. Пусть ими найдены средства сообщения, позволяющие им быстро покрывать огромные расстояния. Тогда они найдут, что, отправляясь в путешествие прямо вперед, они, в конце концов, вернутся к своей исходной точке. «Прямо вперед» означает вдоль большого круга сферы. Они найдут также, что отношение длин двух концентрических окружностей не равно отношению радиусов, если один из радиусов мал, а другой велик.

Если наши двумерные существа консервативны, если их поколение изучало эвклидову геометрию в прошлом, когда они не могли далеко путешествовать и когда эта геометрия соответствовала наблюдаемым фактам, то они, конечно, сделают все возможное, чтобы сохранить ее, несмотря на очевидность своих измерений. Они постараются заставить физику нести бремя этих противоречий. Они станут искать какие-либо физические основания, скажем, различие температур, деформирующее линии и вызывающее отклонение от эвклидовой геометрии. Но раньше или позже они должны будут найти, что имеется гораздо более логический и последовательный путь описания этих явлений. Они окончательно поймут, что их мир конечен, что его геометрические принципы отличны от тех, которые они изучали. Несмотря на свою неспособность представить себе свой мир, они поймут, что он есть двумерная поверхность сферы. Они скоро изучат новые принципы геометрии, которая, хотя и отличается от эвклидовой, тем не менее может быть сформулирована так же последовательно и логично для их двумерного мира. Новому поколению, воспитанному на знании сферической геометрии, старая эвклидова геометрия будет казаться более сложной и искусственной, так как она не соответствует наблюдаемым фактам.

Вернемся к трехмерным существам нашего мира.

Что это значит, когда утверждают, что наше трехмерное пространство имеет эвклидов характер? Смысл этого в том, что все логически доказанные положения эвклидовой геометрии могут быть точно подтверждены действительным экспериментом. С помощью твердых тел или световых лучей мы можем построить объекты, соответствующие идеализированным объектам эвклидовой геометрии. Ребро линейки или световой луч соответствуют прямой. Сумма углов треугольника, построенного из тонких жестких стержней, равна 180 градусам. Отношение радиусов двух

концентрических окружностей, построенных из тонкой упругой проволоки, равно отношению длин окружностей. Истолкованная таким образом эвклидова геометрия становится главой физики, хотя и очень простой ее главой.

Но мы можем представить себе, что обнаружены противоречия: например, что сумма углов большого треугольника, построенного из стержней, которые по многим основаниям должны были считаться твердыми, не равна 180 градусам. Так как мы уже прибегали к идее конкретного представления объектов эвклидовой геометрии с помощью твердых тел, то мы, вероятно, стали бы искать какие-либо физические силы, которые явились причиной

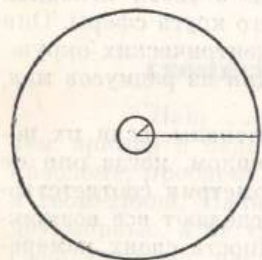


Рис. 11.

такого неожиданного поведения наших стержней. Мы постарались бы найти физическую природу этих сил и их влияние на другие явления. Чтобы спасти эвклидову геометрию, мы обвинили бы объекты в том, что они не тверды, что они не точно соответствуют объектам эвклидовой геометрии. Мы постарались бы найти лучшие тела, ведущие себя так, как это ожидается согласно эвклидовой геометрии. Если бы, однако, нам не удалось объединить эвклидову геометрию и физику в простую и последовательную картину, то мы должны были бы отказаться от идеи, что наше пространство эвклидово, и искать более последовательную картину реальности на основе более общих предположений о геометрических свойствах нашего пространства.

Необходимость этого может быть проиллюстрирована с помощью идеализированного эксперимента, показывающего, что действительно релятивистская физика не может основываться на эвклидовой геометрии. Наши рассуждения будут предполагать, что уже известны выводы, касающиеся инерциальной системы координат, а также специальная теория относительности.

Представим себе большой диск с двумя концентрическими окружностями, нарисованными на нем; одна из этих окружностей мала, другая очень велика (рис. 11). Диск быстро вращается. Он вращается относительно внешнего наблюдателя; пусть имеется еще внутренний наблюдатель, помещающийся на диске. Предположим далее, что система координат внешнего наблюдателя инерциальна. Внешний наблюдатель может нарисовать в своей инерциальной системе две такие же окружности — малую и большую, покоящиеся в его системе, но совпадающие с окружностями на вращающемся диске. Эвклидова геометрия справедлива в его системе координат, так как его система инерциальна, — так что отношение длин окружностей равно отношению радиусов. А что же находит наблюдатель на диске? С точки зрения классической фи-

зики, а также специальной теории относительности его система координат недопустима. Но если мы стремимся найти новую форму физических законов, справедливую в любой системе координат, то мы должны рассматривать наблюдателя на диске и наблюдателя внешнего с одинаковой серьезностью. Теперь мы исследуем за попыткой внутреннего наблюдателя найти путем измерения длины окружностей и радиусов на вращающемся диске. Он использует такой же небольшой измерительный масштаб, какой был использован внешним наблюдателем. «Такой же» означает либо действительно тот же, просто переданный внешним наблюдателем внутреннему, либо один из двух масштабов, имеющихся одинаковую длину в покоящейся системе координат.

Внутренний наблюдатель на диске, начиная измерение радиуса и длины окружности малого круга. Его результат может оказаться таким же, как и результат внешнего наблюдателя. Ось, на которой вращается диск, проходит через центр. Те части диска, которые близки к центру, имеют очень небольшие скорости. Если окружность достаточно мала, мы можем спокойно применить классическую механику и не обращать внимания на специальную теорию относительности. Это означает, что отрезок имеет одинаковую длину как для внешнего, так и для внутреннего наблюдателя и результат двух измерений будет одинаков для них обоих. Теперь наблюдатель на диске измеряет радиус большой окружности. Помещенный на радиусе отрезок движется относительно внешнего наблюдателя. Однако такой отрезок не сокращается и будет иметь одинаковую длину для обоих наблюдателей, так как направление движения перпендикулярно к отрезку. Таким образом, три измерения одинаковы для обоих наблюдателей: два радиуса и малая окружность. Но не так обстоит дело с четвертым измерением. Длина большой окружности будет различна для обоих наблюдателей. Отрезок, помещенный на окружности в направлении движения, теперь будет казаться сокращенным для внешнего наблюдателя сравнительно с соответствующим ему покоящимся отрезком. Скорость на внешней окружности гораздо больше, чем скорость на внутренней окружности, и это сокращение должно быть учтено. Поэтому, если мы применим выводы специальной теории относительности, наше заключение будет таково: длина большой окружности должна быть различной, если она измеряется обоими наблюдателями. Так как только одна из четырех длин, измеренных обоими наблюдателями, не будет одинаковой для обоих, то для внутреннего наблюдателя отношение обоих радиусов не может быть равным отношению окружностей, как это имеет место для внешнего наблюдателя. Это означает, что наблюдатель на диске не может подтвердить справедливость эвклидовой геометрии в своей системе.

После получения этого результата наблюдатель на диске может сказать, что он не хочет рассматривать систему координат,

в которой несправедлива евклидова геометрия. Нарушение евклидовой геометрии обязано абсолютному вращению, тому факту, что система координат, с которой связан наблюдатель, плоха и недопустима. Но, утверждая это, он отвергает важную идею общей теории относительности. С другой стороны, если мы хотим отвергнуть абсолютное движение и сохранить идею об общей относительности, то вся физика должна быть построена на основе более общей геометрии, чем евклидова. Нет возможности избежать этих следствий, если допустимы все системы координат.

Изменения, произведенные общей теорией относительности, не могут ограничиваться одним пространством. В специальной теории относительности у нас были часы, покоящиеся в каждой из систем координат, имеющие одинаковый ритм и синхронизированные, т. е. показывающие одинаковое время в один и тот же момент. Что происходит с часами в неинерциальной системе координат? Идеализированный эксперимент с диском снова будет нам полезен. Внешний наблюдатель имеет в своей инерциальной системе совершенные часы, которые все синхронизированы, все имеют одинаковый ритм. Внутренний наблюдатель берет двое часов одинакового сорта и помещает один из них на малую внутреннюю окружность, а другие на большую внешнюю. Часы на внутренней окружности имеют очень небольшую скорость по отношению к внешнему наблюдателю. Поэтому мы можем спокойно заключить, что их ритм будет одинаков с ритмом внешних часов. Но часы на большой окружности имеют значительную скорость, изменяющую их ритм сравнительно с часами внешнего наблюдателя, а стало быть, и сравнительно с часами, помещенными на малой окружности. Таким образом, двое вращающихся часов будут иметь различный ритм, а применяя выводы специальной теории относительности, мы снова видим, что мы не можем во вращающейся системе создать какие-либо приборы, подобные приборам в инерциальной системе координат. Чтобы выяснить, какие выводы могут быть сделаны из этого и из описанных ранее идеализированных экспериментов, приведем еще раз разговор между старым физиком С, который верит в классическую физику, и современным физиком Н, который признает общую теорию относительности. Пусть С будет внешним наблюдателем в инерциальной системе координат, а Н — наблюдатель на вращающемся диске.

С. В вашей системе евклидова геометрия несправедлива. Я следил за вашими измерениями, и я согласен, что отношение двух окружностей в вашей системе не равно отношению их радиусов. Но это показывает, что ваша система координат недопустима. А моя система — инерциального характера, и я свободно могу применять евклидову геометрию. Ваш диск находится в абсолютном движении и с точки зрения классической физики образует недопустимую систему, в которой законы механики несправедливы.

Н. Я не хочу ничего слышать об абсолютном движении. Моя система так же хороша, как и ваша. Что я заметил, так это ваше вращение по отношению к моему диску. Никто не может мне запретить отнестись все движения к моему диску.

С. Но не чувствовали ли вы странной силы, стремящейся удалить вас от центра диска? Если бы ваш диск не был быстро вращающейся каруселью, то две вещи, которые вы наблюдали, конечно, не имели бы места. Вы не заметили бы силы, толкающей вас к границе диска, и не заметили бы, что евклидова геометрия неприменима в вашей системе. Не достаточно ли эти факты, чтобы убедить вас, что ваша система находится в абсолютном движении?

Н. Вовсе нет! Я, конечно, заметил оба факта, упомянутые вами, но я полагаю, что оба они вызваны сильным полем тяготения, действующим на мой диск. Поле тяготения, направленное от центра диска, деформирует мои твердые тела и изменяет ритм моих часов. Поле тяготения, неевклидова геометрия, часы с различным ритмом — все это кажется мне тесно связанным. Принимая какую-либо систему координат, я должен одновременно предположить наличие соответствующего поля тяготения и его влияние на твердые тела и часы.

С. Но вы знаете о трудностях, вызванных вашей общей теорией относительности? Мне хотелось бы сделать свою точку зрения ясной, приведя простой, не физический пример. Представим себе идеализированный американский город, состоящий из параллельных улиц с параллельными проспектами, расположенными перпендикулярно к ним (рис. 12). Расстояние между улицами, а также между проспектами всюду одно и то же. Поскольку это так, то и кварталы совершенно одинаковы по величине. Таким путем я могу легко характеризовать положение любого квартала. Но это построение было бы невозможно без евклидовой геометрии. Таким образом, например, мы не можем покрыть всю нашу Землю одним большим идеальным американским городом. Один взгляд на глобус убедит вас в этом. Но мы не могли бы покрыть и ваш диск такой «американской городской конструкцией». Вы утверждаете, что ваши стержни деформированы гравитационным полем. Тот факт, что

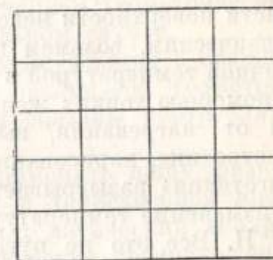


Рис. 12.

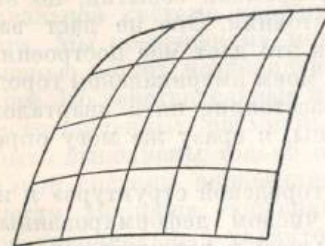


Рис. 13.

вы не могли подтвердить теорему Эвклида о равенстве отношений радиусов и окружностей, ясно показывает, что если вы продолжите такое строительство улиц и проспектов достаточно далеко, то рано или поздно вы придете к трудностям и найдете, что оно невозможно на вашем диске. Ваша геометрия на вращающемся диске подобна геометрии на кривой поверхности, где, конечно, указанное построение улиц и проспектов на достаточно большой части поверхности невозможно. Для того чтобы пример был более физическим, возьмем пластинку, неравномерно нагретую, с различной температурой в разных частях поверхности. Можете ли вы с помощью тонких железных прутьев, длина которых увеличивается от нагревания, выполнить «параллельно-перпендикулярное» построение, нарисованное мною ниже? Конечно, нет! Ваше «поле тяготения» разыгрывает над вашими стержнями ту же шутку, что и изменение температуры над тонкими железными прутами.

Н. Все это не пугает меня. Построение улиц и проспектов необходимо для того, чтобы определить положения точек, часы — для того, чтобы установить порядок событий. Вовсе не необходимо, чтобы город был американским: с таким же успехом он может быть и древнеевропейским. Представим себе идеализированный город, построенный из пластичного материала и затем деформированный (рис. 13). Я могу все еще подсчитать кварталы и узнать улицы и проспекты, хотя они уже больше не прямые и не равноудалены друг от друга. Подобно этому долги и широты отмечают положения точек на нашей Земле, хотя на ней и нельзя осуществить построения «американского города».

С. Но я вижу еще трудность. Вы вынуждены использовать вашу «европейскую городскую структуру». Я согласен, что вы можете установить порядок точек или времени событий, но это построение спутает все измерения расстояний. Оно не даст вам метрические свойства пространства, как это дает мое построение. Возьмем пример. Я знаю, что, пройдя в моем американском городе десять кварталов, я дважды покрою расстояние пяти кварталов. Так как я знаю, что все кварталы равны, я сразу же могу определить расстояния.

Н. Это верно. В моей «европейской городской структуре» я не могу сразу же определить расстояния числом деформированных кварталов. Я должен знать кое-что большее; я должен знать геометрические свойства моей поверхности. Совершенно так же каждый знает, что расстояние между 0° и 10° долготы на экваторе не равно расстоянию между теми же долготами вблизи Северного полюса. Но всякий штурман знает, как оценить расстояние между двумя такими точками на нашей Земле, ибо он знает ее геометрические свойства. Он может сделать это либо путем подсчета, основываясь на знании сферической тригонометрии, либо экспериментальным путем, проводя свой корабль по обоим путям с одинаковой скоростью. В вашем случае вся проблема тривиальна,

ибо все улицы и проспекты равно отстоят друг от друга. В случае нашей Земли это уже более сложно; два меридиана 0° и 10° пересекаются на земных полюсах и наиболее отдалены друг от друга на экваторе. Подобно этому, чтобы определять расстояния, я должен знать в своей «европейской городской структуре» нечто большее, чем вы в своей «американской городской структуре». Я могу получить эти дополнительные знания изучением геометрических свойств моего континуума в каждом отдельном случае.

С. Все это только показывает, к какому неудобству и сложности приводит потеря простой структуры эвклидовой геометрии ради запутанных построений, которые вы обязаны употреблять. Действительно ли это необходимо?

Н. Боюсь, что да, если мы желаем применять нашу физику в любой системе координат, не прибегая к таинственной инерциальной системе. Я согласен, что мой математический аппарат гораздо сложнее вашего, но зато мои физические предположения более просты и естественны.

Дискуссия ограничивалась двухмерным континуумом. Предмет спора в общей теории относительности еще более сложен, так как там — не двухмерный, а четырехмерный пространственно-временной континуум. Но идеи те же, что и набросанные здесь для случая двухмерного пространства. В общей теории относительности мы не можем применять механических построений, с помощью сети параллельно-перпендикулярных стержней и синхронизированных часов, как в специальной теории относительности. В произвольной системе координат мы не можем определить точку и момент времени, в которые произошло событие, используя твердые стержни и ритмичные и синхронизированные часы, как в инерциальной системе координат специальной теории относительности. Мы по-прежнему можем установить порядок событий с помощью наших неэвклидовых стержней и часов с различным ритмом. Но действительные измерения, требующие твердых стержней и совершенных ритмичных и синхронизированных часов, могут быть выполнены только в локальной инерциальной системе. Для такой системы справедлива вся специальная теория относительности. Но наша «хорошая» система координат только локальна, ее инерциальный характер ограничен в пространстве и времени. Даже в нашей произвольной системе координат мы можем предвидеть результаты измерений, сделанные в локальной инерциальной системе. Но для этого мы должны знать геометрический характер нашего пространственно-временного континуума.

Наши идеализированные эксперименты показывают только общий характер новой релятивистской физики. Эти эксперименты показывают нам, что основной проблемой является проблема тяготения. Они показывают нам также, что общая теория относительности приводит к дальнейшему обобщению понятий времени и пространства.

ОБЩАЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ И ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Общая теория относительности пытается сформулировать физические законы для всех систем координат. Фундаментальная проблема теории относительности есть проблема тяготения. Теория относительности сделала первое со времени Ньютона серьезное усилие заново сформулировать закон тяготения. Действительно ли это необходимо? Мы уже узнали о достижениях теории Ньютона, об огромном развитии астрономии, основанном на его законе тяготения. Ньютонов закон еще остается основой всех астрономических расчетов. Но мы узнали также о некоторых возражениях против старой теории. Ньютонов закон справедлив только в инерциальной системе координат классической физики, в системе координат, определенной, как мы помним, условием, что в ней должны быть справедливы законы механики. Сила, действующая между двумя массами, зависит от расстояния между ними. Связь между силой и расстоянием, как мы знаем, инвариантна относительно классических преобразований. Но этот закон не соответствует строению специальной теории относительности. Расстояние не инвариантно по отношению к преобразованиям Лоренца. Мы могли бы стараться, что мы и делали успешно в отношении законов движения, обобщить закон тяготения, сделать его соответствующим специальной теории относительности или, другими словами, формулировать его так, чтобы он был инвариантным по отношению к преобразованиям Лоренца, а не по отношению к классическим преобразованиям. Но ньютонов закон тяготения упрямо сопротивляется всем нашим усилиям упростить и приспособить его к схеме специальной теории относительности. Даже если бы это и удалось нам, был бы необходим еще дальнейший шаг, шаг от инерциальной системы координат специальной теории относительности к произвольной системе общей теории относительности. С другой стороны, идеализированный эксперимент с падающим лифтом ясно показывает, что нет шансов сформулировать общую теорию относительности без разрешения проблемы тяготения. Из наших рассуждений видно, почему решение проблемы тяготения различно в классической физике и в общей теории относительности.

Мы постарались показать путь, ведущий нас к общей теории относительности, и основания, вынуждающие нас еще раз изменить наши старые взгляды. Не входя в формальную структуру теории, мы охарактеризуем некоторые черты новой теории тяготения для сравнения со старой. Не слишком трудно будет понять природу различий обеих теорий после всего, что было ранее сказано.

1. Гравитационные уравнения общей теории относительности могут быть применены к любой системе координат. Выбрать ка-

кую-либо особую систему координат в специальном случае — дело лишь удобства. Теоретически допустимы все системы координат. Игнорируя тяготение, мы автоматически возвращаемся к инерциальной системе специальной теории относительности.

2. Ньютонов закон тяготения связывает движение тела здесь и теперь с действием другого тела в то же самое время на далеком расстоянии. Этот закон стал образцом для всего механистического мировоззрения. Но механистическое мировоззрение потерпело крах. В уравнениях Максвелла мы создали новый образец для законов природы. Уравнения Максвелла суть структурные законы. Они связывают события, которые происходят теперь и здесь, с событиями, которые происходят немного позднее и в непосредственном соседстве. Они суть законы, описывающие электромагнитное поле. Наши новые гравитационные уравнения суть также структурные законы, описывающие изменение поля тяготения. Схематически мы можем сказать: переход от ньютонова закона тяготения к общей относительности до некоторой степени аналогичен переходу от теории электрических жидкостей и закона Кулона к теории Максвелла.

3. Наш мир неевклидов. Геометрическая природа его образована массами и их скоростями. Гравитационные уравнения общей теории относительности стремятся раскрыть геометрические свойства нашего мира.

Предположим на минуту, что нам удалось последовательно выполнить программу общей теории относительности. Но не грозит ли нам опасность увлечения спекуляциями, слишком далекими от реальности? Мы знаем, как хорошо старая теория объясняет астрономические наблюдения. Можно ли построить мост между новой теорией и наблюдением? Каждое рассуждение должно проверяться экспериментом, и любые выводы, как бы привлекательны они ни были, должны отбрасываться, если не соответствуют фактам. Как выдержала новая теория тяготения экспериментальную проверку? Ответ на этот вопрос можно дать в следующем предложении: старая теория есть особый предельный случай новой. Если силы тяготения сравнительно слабы, прежний ньютонов закон оказывается хорошим приближением к новым законам тяготения. Таким образом, все наблюдения, подтверждающие классическую теорию, подтверждают и общую теорию относительности. Мы вновь приходим к старой теории от более высокого уровня новой.

Даже если бы нельзя было указать дополнительных наблюдений в пользу новой теории, если бы ее объяснения были лишь столь же хороши, как и объяснения старой теории, предоставляя тем самым свободный выбор между обеими теориями, мы должны были бы отдать предпочтение новой. Уравнения новой теории, с формальной точки зрения, сложнее, но их предпосылки, с точки зрения основных принципов, гораздо проще. Исчезли два

страшных привидения — абсолютное время и инерциальная система. Чрезвычайно важная идея эквивалентности тяжелой и инертной масс не осталась без внимания. Не надо допускать, касающихся сил тяготения и их зависимости от расстояния. Уравнения тяготения имеют форму структурных законов, форму, которая требуется от всех физических законов со времени великих достижений теории поля.

Из новых гравитационных законов могут быть сделаны и новые выводы, не содержащиеся в законах тяготения Ньютона. Один вывод, а именно отклонение светового луча в поле тяготения, уже указывался. Приведем еще два других следствия.

Если старые законы вытекают из новых, когда силы тяготения слабы, то отклонения от ньютонова закона тяготения можно ожидать только для сравнительно больших сил тяготения. Возьмем нашу солнечную систему. Планеты, и среди них наша Земля, движутся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца. Меркурий — планета, наиболее близкая к Солнцу. Притяжение между Солнцем и Меркурием сильнее, чем между Солнцем и любой другой планетой, так как расстояние его от Солнца меньше. Если имеется какая-либо надежда найти отклонение от закона Ньютона, то наибольший шанс — движение Меркурия. Из классической теории следует, что путь, описываемый Меркурием, того же вида, как и путь любой другой планеты, и отличается лишь тем, что он ближе к Солнцу. Согласно общей теории относительности, движение должно немного отличаться. Не только Меркурий должен вращаться вокруг Солнца, но и эллипс, который он описывает, должен очень медленно вращаться относительно системы координат, связанной с Солнцем (рис. 14). Это вращение эллипса выражает новый эффект общей теории относительности. Новая теория предсказывает величину этого эффекта. Эллипс Меркурия осуществлял бы полное вращение в три миллиона лет! Мы видим, как незначителен этот эффект и как безнадежно было бы искать его в отношении планет, обращающихся на более далеком расстоянии от Солнца.

Отклонение орбиты планеты Меркурия от эллиптической было известно прежде, чем была сформулирована общая теория относительности, но никакого объяснения этому нельзя было найти. С другой стороны, общая теория относительности развивалась без всякого внимания к этой специальной проблеме. Заключение о вращении эллипса при движении планеты вокруг Солнца было сделано позднее из новых гравитационных уравнений. Теория успешно объяснила отклонение действительно происходящего движения Меркурия от движения, предписываемого законом Ньютона.

Но существует еще одно заключение, которое было сделано из общей теории относительности и сравнено с опытом. Мы уже видели, что ритм часов, помещенных на большой окружности вра-

щающегося диска, отличен от ритма часов, помещенных на меньшем круге. Аналогично, из теории относительности следует, что ритм часов, помещенных на Солнце, отличался бы от ритма часов, помещенных на Земле, так как влияние поля тяготения гораздо сильнее на Солнце, чем на Земле.

Мы заметили [ранее], что натрий, когда он раскален, испускает однородный желтый свет определенной длины волны. В этом излучении атом обнаруживает один из своих ритмов; атом представляет собой, так сказать, часы, а излученная длина волны — один из его ритмов. Согласно общей теории относительности, длина волны света, излученного атомом натрия, скажем, помещенного на Солнце, должна быть несколько больше, чем длина волны света, излученного атомом натрия на нашей Земле.

Проблема проверки следствий общей теории относительности путем наблюдений сложна и точно никоим образом не решена. Поскольку мы интересуемся принципиальными идеями, мы не хотим входить в этот предмет глубже, а только устанавливаем, что пока приговор эксперимента, по-видимому, таков: подтвердить выводы, сделанные из общей теории относительности.

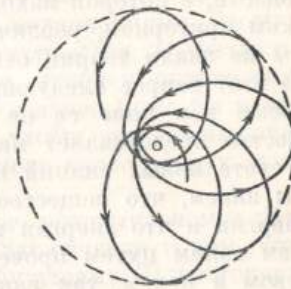


Рис. 14.

ПОЛЕ И ВЕЩЕСТВО

Мы видели, как и почему механистическая точка зрения потерпела крах. Невозможно было объяснить все явления, предполагая, что между неизменными частицами действуют простые силы. Первые попытки отойти от механистического взгляда и ввести понятия поля оказались наиболее успешными в области электромагнитных явлений. Были сформулированы структурные законы для электромагнитного поля, — законы, связывающие события, смежные в пространстве и во времени. Эти законы соответствуют характеру специальной теории относительности, так как они инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца. Позднее общая теория относительности сформулировала законы тяготения. Они опять-таки являются структурными законами, описывающими поле тяготения между материальными частицами. Точно так же легко было обобщить уравнения Максвелла так, чтобы их можно было применить в любой системе координат, аналогично законам тяготения общей теории относительности.

Мы имеем две реальности: *вещество и поле*. Несомненно, что в настоящее время мы не можем представить себе всю физику построенной на понятии вещества, как это делали физики в начале

девятнадцатого столетия. В настоящее время мы принимаем оба понятия. Можем ли мы считать вещество и поле двумя различными, несходными реальностями? Пусть дана маленькая частица вещества; мы могли бы наивно представить себе, что имеется определенная поверхность частицы, за пределами которой ее уже нет, а появляется ее поле тяготения. В нашей картине область, в которой справедливы законы поля, резко отделена от области, в которой находится вещество. Но что является физическим критерием, различающим вещество и поле? Раньше, когда мы не знали теории относительности, мы пытались бы ответить на этот вопрос следующим образом: вещество имеет массу, в то время как поле ее не имеет. Поле представляет энергию, вещество представляет массу. Но мы уже знаем, что такой ответ в свете новых знаний недостаточен. Из теории относительности мы знаем, что вещество представляет собой огромные запасы энергии и что энергия представляет собой вещество. Мы не можем таким путем провести качественное различие между веществом и полем, так как различие между массой и энергией не качественное. Гораздо большая часть энергии сосредоточена в веществе, но поле, окружающее частицу, также представляет собой энергию, хотя и в несравненно меньшем количестве. Поэтому мы могли бы сказать: вещество — там, где концентрация энергии велика, поле — там, где концентрация энергии мала. Но если это так, то различие между веществом и полем скорее количественное, чем качественное. Нет смысла рассматривать вещество и поле как два качества, совершенно отличные друг от друга. Мы не можем представить себе определенную поверхность, ясно разделяющую поле и вещество.

Те же трудности вырастают для заряда и его поля. Кажется невозможным дать ясный качественный критерий для различения между веществом и полем или зарядом и полем.

Структурные законы, т. е. законы Максвелла и гравитационные законы, нарушаются для очень большой концентрации энергии или, как мы можем сказать, они нарушаются там, где присутствуют источники поля, т. е. электрические заряды или вещество. Но не можем ли мы слегка модифицировать наши уравнения так, чтобы они были справедливы всюду, даже в областях, где энергия колоссально сконцентрирована?

Мы не можем построить физику на основе только одного понятия — вещества. Но деление на вещество и поле, после признания эквивалентности массы и энергии, есть нечто искусственное и неясно определенное. Не можем ли мы отказаться от понятия вещества и построить чистую физику поля? То, что действует на наши чувства в виде вещества, есть на деле огромная концентрация энергии в сравнительно малом пространстве. Мы могли бы рассматривать вещество как такие области в пространстве, где поле чрезвычайно сильно. Таким путем можно было бы создать

основы новой философии. Ее конечная цель состояла бы в объяснении всех событий в природе структурными законами, справедливыми всегда и всюду. С этой точки зрения брошенный камень есть изменяющееся поле, в котором состояния наибольшей интенсивности поля перемещаются в пространстве со скоростью камня. В нашей новой физике не было бы места и для поля, и для вещества, поскольку единственной реальностью было бы поле. Этот новый взгляд внушен огромными достижениями физики поля, успехом в выражении законов электричества, магнетизма, тяготения в форме структурных законов и, наконец, эквивалентности массы и энергии. Нашей основной задачей было бы модифицировать законы поля таким образом, чтобы они не нарушались для областей, в которых энергия имеет колоссальную концентрацию.

Но до сих пор мы не имели успеха в последовательном и убедительном выполнении этой программы. Заключение о том, возможно ли ее выполнить, — принадлежит будущему. В настоящее время во всех наших реальных теоретических построениях мы все еще должны допускать две реальности — поле и вещество.

Фундаментальные проблемы еще стоят перед нами. Мы знаем, что все вещество состоит лишь из частиц немногих видов. Как различные формы вещества построены из этих элементарных частиц? Как эти элементарные частицы взаимодействуют с полем? Поиски ответа на эти вопросы привели к новым идеям в физике, идеям квантовой теории.

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ:

В физике появилось новое понятие, самое важное достижение со времени Ньютона: поле. Потребовалось большое научное воображение, чтобы уяснить себе, что не заряды и не частицы, а поле в пространстве между зарядами и частицами существенно для описания физических явлений. Понятие поля оказывается весьма удачным и приводит к формулированию уравнений Максвелла, описывающих структуру электромагнитного поля, управляющих электрическими, равно как и оптическими явлениями.

Теория относительности возникает из проблемы поля. Противоречия и непоследовательность старых теорий вынуждают нас приписывать новые свойства пространственно-временному континууму, этой арене, на которой разыгрываются все события нашего физического мира.

Теория относительности развивается двумя этапами. Первый этап приводит к так называемой специальной теории относительности, применяемой только к инерциальным системам координат, т. е. к системам, в которых справедлив закон инерции, как он был сформулирован Ньютоном. Специальная теория относительности основывается на двух фундаментальных положениях: физические законы одинаковы во всех системах координат, дви-

жущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга; скорость света всегда имеет одно и то же значение. Из этих положений, полностью подтвержденных экспериментом, выведены свойства движущихся стержней и часов, изменения их длины и ритма, зависящие от скорости. Теория относительности изменяет законы механики. Старые законы несправедливы, если скорость движущейся частицы приближается к скорости света. Новые законы движения тела, сформулированные теорией относительности, блестяще подтверждаются экспериментом. Дальнейшее следствие теории относительности (специальной) есть связь между массой и энергией. Масса — это энергия, а энергия имеет массу. Оба закона сохранения — закон сохранения массы и закон сохранения энергии — объединяются теорией относительности в один закон, в закон сохранения массы-энергии.

Общая теория относительности дает еще более глубокий анализ пространственно-временного континуума. Справедливость теории относительности больше не ограничивается инерциальными системами координат. Теория берется за проблему тяготения и формулирует новые структурные законы для поля тяготения. Она заставляет нас проанализировать роль, которую играет геометрия в описании физического мира. Эквивалентность тяжелой и инертной масс она рассматривает как существенный, а не просто случайный факт, каким она была в классической механике. Экспериментальные следствия общей теории относительности лишь слегка отличаются от следствий классической механики. Они выдерживают экспериментальную проверку всюду, где возможно сравнение. Но сила теории заключается в ее внутренней согласованности и простоте ее основных положений.

Теория относительности подчеркивает важность понятия поля в физике. Но нам еще не удалось сформулировать чистую физику поля. В настоящее время мы должны еще предполагать существование и поля, и вещества.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ФИЗИКА И РЕАЛЬНОСТЬ У ЭЙНШТЕЙНА

Этот сборник назван: «Физика и реальность» по заголовку одной из наиболее крупных включенных в него статей Эйнштейна. Проблема физического описания реальности проходит, в качестве стержневой, через все публикуемые статьи и, более того, через все творчество Эйнштейна. Пожалуй, будет уместно здесь, в послесловии, коснуться этой проблемы — тех ее аспектов, которые непосредственно связаны с основными открытиями и обобщениями Эйнштейна. Речь отнюдь не идет о проблеме физического описания реальности, проблеме «физика и реальность» в целом, — такая проблема не может трактоваться только в связи с работами Эйнштейна. Речь идет о другом: как эйнштейновские критерии отображения реальности в физике «работали» при создании специальной и общей теории относительности, а также о том, как эти критерии отразились в выступлениях Эйнштейна по поводу квантовой механики.

Исходная позиция Эйнштейна — существование универсальной причинной связи, каузального *ratio*, каузальной гармонии мира. Физическая теория должна анализировать каждое отдельное явление в его связи с универсальной гармонией мироздания. Специальные объяснения, вводимые только для объяснения данного экспериментального результата, противостоят идеалу научного объяснения. Поэтому Эйнштейн в своем автобиографическом наброске 1949 г. говорил о двух критериях — «внешнем оправдании» (соответствии между теорией и наблюдениями) и «внутреннем совершенстве» (логической стройности теории). В статье «О современном состоянии теории поля» Эйнштейн пишет о целях и путях научного познания. «Теория преследует две цели: 1. Охватить по возможности все явления и их взаимосвязи (полнота); 2. Добиваться этого, взяв за основу как можно меньше логически взаимно независимых понятий и произвольно установленных соотношений между ними (основных законов или аксиом). Эту цель я буду называть «логической единственностью».

В идеале мы выводим с необходимостью все, что происходит в природе, из наименьшего числа допущений.

«Грубо, но честно, второе пожелание можно выразить также следующим образом: мы хотим не только знать, как устроена природа (и как происходят природные явления), но и по возможности достичь цели, может быть утопической и дерзкой на вид, — узнать, почему природа является именно такой, а не другой. В этом ученые находят наивысшее удовлетворение».

С этой точки зрения, с точки зрения каузального описания реальности Эйнштейн рассматривает основы классической науки. Какое исходное

понятие физической реальности лежало в основе механики Ньютона? Это понятие *тела*, отличающегося от окружающего пространства, обладающего массой, находящегося во взаимодействии с другими телами. Реально существуют не только тела, но и пространство, в котором они движутся. Но мы можем наблюдать только тела, и идеалом *физического объяснения*, оперирующего понятиями, сопоставимыми с наблюдаемыми, является картина движения тел. Движение проявляется в изменении расстояний между телами. Полное отображение реальности в физике состоит в том, что мы прослеживаем движение тела, каждой его точки, в пространстве, определяя расстояния между телами для каждого момента времени. В статье «Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики» (1927) Эйнштейн говорит, что описание реальности после Ньютона приобрело вид дифференциального закона. Физическое *причинное* описание реальности — это в последнем счете описание поведения частиц от точки к точке и от мгновения к мгновению, установление закона, зная который мы можем указать для каждого мгновения пространственное положение частицы, а если речь идет о теле, то — центра его тяжести. Законы Кеплера не дают причинного описания движения планет, потому что они не связаны один с другим и не являются единым *дифференциальным* законом. «Но самое главное заключается в том, что эти законы относятся к движению в целом, и не позволяют вывести из заданного состояния движения другое состояние, во времени непосредственно следующее за первым. По современной терминологии мы бы сказали, что они являются законами интегральными, а не дифференциальными. Дифференциальный закон является той единственной формой причинного объяснения, которая может полностью удовлетворять современного физика. Ясное понимание дифференциального закона есть одно из величайших духовных достижений Ньютона. Но необходима была не только идея о законе, но и математический формализм, который, правда, существовал в зачатке, но которому нужно было придать систематическую форму».

Однако дифференциальный закон движения еще не описывает реальность причинным образом. Когда Ньютон перешел от положений тел ко вторым производным от положения по времени, это было гигантским шагом вперед. «Но этим далеко еще не было достигнуто причинное понимание явлений движения. Уравнение движения только тогда определяет само движение, когда задана сила. Ньютоном владела навевшая закономерностями движения планет мысль, что действующая на некоторую массу сила зависит от положения всех остальных масс, расположенных достаточно близко от рассматриваемой. Только после установления этой зависимости было получено окончательное причинное объяснение явлений движения. Каким образом, исходя из кеплеровых законов движения планет, Ньютон разрешил эту задачу для тяготения и этим показал тождественность силы тяжести и сил, действующих на небесные тела, общеизвестно. Только совокупность: (закон движения) плюс (закон тяготения) образует ту замечательную систему мыслей, которая в случае, когда явления происходят под действием одной лишь силы тяготения, позволяет по заданному в определенный момент состоянию движения найти предшествующие и последующие состояния».

Именно в такой возможности Эйнштейн и видит идеал физического описания реальности.

Такое описание выводит из пребывания тела в данном месте его пребывание в определенном месте в каждый следующий момент. Но речь должна идти о том же самом теле. Поэтому предпосылкой ньютоновой программы описания реальности Эйнштейн считает представление о теле, которое остается тождественным самому себе, несмотря на изменение своего положения. Другие изменения, изменения состояния, рассматриваются как результат движения тождественных себе тел, изменяющих только пространственное положение. В ряде случаев изменения состояния игнорируются. Так образуется понятие пространства, в котором опреде-

лено положение тела. Мы выбираем какое-то твердое тело (т. е. тело, не меняющее формы, а только положение) и приближаем к нему до полного соприкосновения другое твердое тело. Эту операцию можно продолжать бесконечно. Тогда мы получаем тело отсчета и бесконечное, связанное с ним, пространство, в котором может быть определено положение данного тела.

«Тот факт, что каждый, любым образом расположенный, телесный объект может быть приведен в контакт с квазитвердым продолжением определенным образом выбранного тела B_0 (тела отсчета), является, по моему, эмпирической основой нашего понятия о пространстве. В донаучном мышлении роль B_0 и его продолжения играла твердая кора Земли».

Из всего этого построения вытекает, что пространство «само по себе», без мысленно или реально вводимых тел отсчета, не может быть причиной наблюдаемых явлений. Описание реальности оперирует телами и с относительными пространствами — реальными или мысленными, твердыми или квазитвердыми продолжениями тел отсчета. Но Ньютон вводит еще один элемент, фигурирующий в физической картине движения. Это абсолютное пространство. Когда ведро вращается, вода поднимается к его краям. Тут нельзя сослаться на то, что ведро вращается по отношению к какому-то телу отсчета: в этом случае можно было бы сказать, что тело отсчета движется вокруг ведра, и эти описания должны оба соответствовать наблюдениям. Но в указанном, втором случае вода не поднимается к краям ведра. Значит, для причинного описания движения нужно сослаться на изменения положения тела не по отношению к телу отсчета, а по отношению к пространству, как таковому.

«Хотя всюду заметно стремление Ньютона представить свою систему как необходимо вытекающую из опыта и вводить возможно меньше понятий, не относящихся непосредственно к опыту, он тем не менее вводит понятия абсолютного пространства и абсолютного времени. В наше время это ему часто ставили в упрек. Но именно в этом пункте Ньютон особенно последователен. Он обнаружил, что наблюдаемые геометрические величины (расстояния между материальными точками) и их изменения по времени в физическом смысле не характеризуют полностью движения. Это положение он доказывает своим знаменитым опытом с ведром. Следовательно, кроме масс и изменяющихся во времени расстояний между ними, существует еще нечто, что определяет происходящие события, это «нечто» он воспринимал как отношение к «абсолютному пространству». Ньютон понимал, что его законы могут иметь смысл, только если пространство обладает физической реальностью в той же мере, как материальные точки и расстояния между ними».

Таким образом механика Ньютона отступила от того идеала, который Эйнштейн считал классическим идеалом причинного описания: в картину мира вводятся, кроме тел, абсолютное пространство.

Вскоре появилось представление о физической реальности, которую нельзя отождествить ни с телами, ни с ньютоновым пустым пространством. В этом — бессмертный подвиг Фарадея.

«Оказалось, что обусловленное электрическими и магнитными зарядами взаимодействие между телами является следствием не действующих между ними мгновенных сил дальнего действия, а процессов, распространяющихся в пространстве с конечной скоростью. Согласно концепции Фарадея, наряду с материальной точкой и ее движением появилась новая физическая реальность, а именно «поле». Исходя из механических представлений, сначала пытались рассматривать поле как некоторое механическое состояние (движения или напряжения) гипотетической среды (эфира), заполняющей пространство. Но поскольку, несмотря на настоятельные попытки, такая механическая трактовка не увенчалась успехом, постепенно привыкли рассматривать «электромагнитное поле» как последний, не сводимый ни к чему другому, структурный элемент физической реальности».

Теория поля, как физической реальности, достигла некоторой согласованности с ньютоновой концепцией абсолютного пространства. Поло начали рассматривать в связи с *эфиром* — некоторым неподвижным всезаполняющим телом. Но это понятие не могло удовлетворять эйнштейновскому критерию описания реальности. Движение нельзя относить к эфиру и считать его абсолютным. Эксперимент показал, что оптические процессы происходят единообразно в системах, движущихся одна относительно другой без ускорения. Эйнштейн придал этому обстоятельству принципиальный характер: движение относительно эфира не является физически реальным процессом. Исходя из своего критерия физического описания реальности Эйнштейн отказался причислить эфир к реальным телам. Значение указанного критерия для генезиса специальной теории относительности хорошо видно в том кратком изложении теории относительности, которое мы встречаем в «Принципах теоретической физики».

«Анализ основных представлений о пространстве и времени показал, что установленный в оптике движущихся тел закон постоянства скорости света в вакууме отнюдь не принуждает принять теорию некоторого неподвижного эфира. Напротив того, нужно построить общую теорию, учитывающую то обстоятельство, что в проведенных на Земле опытах нельзя заметить каких-либо проявлений поступательного движения Земли. При этом используется принцип относительности, который гласит: вид законов природы не меняется, если от начальной (принятой за таковую) системы координат перейти к другой, обладающей равномерным поступательным движением относительно первой».

Из специальной теории относительности следует, что трехмерная геометрия не имеет, строго говоря, физического эквивалента, что не может быть трехмерного физического описания реальных процессов. В ньютоновой механике непрерывный, соответствующий дифференциальному закону движения ряд положений материальной точки считался физическим описанием реального процесса. Механика Ньютона допускала мгновенное распространение поля, и, таким образом, ряд одновременных (т. е. с нулевым временным различием) пространственных положений отвечал реальному процессу, был описанием реальности. Теория относительности Эйнштейна отвергает не только мгновенное распространение взаимодействий между телами, но и вообще всякую возможность синхронизировать события, произошедшие в двух различных, движущихся одна относительно другой системах. Реальный процесс получает физическое описание, если мы сопоставляем его ряду мировых точек, т. е. значений четырех координат — трех пространственных, и четвертой — временной. Обычные евклидовы соотношения, относящиеся к пространству — времени (при измерении времени особыми единицами, дающими основание назвать эти соотношения псевдоевклидовыми), т. е. четырехмерные соотношения, аналогичные евклидовым, становятся физическим описанием действительности. Четырехмерная точка, мировая точка, — четыре значения пространственно-временных координат соответствует *событию*, пребыванию частицы в данной пространственной точке в данный момент. Четырехмерная линия — мировая линия, совокупность мировых точек, соответствует движению частицы. Исчерпывают ли мировые точки и мировые линии физическое описание реальности? На этом вопросе нам вскоре придется остановиться, а пока отметим только следующее.

Трехмерная геометрия приобретает физический смысл, когда мы прибавляем к трехмерному физическому объекту — твердому или квазитвердому телу отсчета — соприкасающиеся с ним другие твердые или квазитвердые тела. Тогда мы получали относительное трехмерное пространство, связанное с физическими объектами — твердыми или квазитвердыми телами.

В теории относительности четырехмерное пространственно-временное многообразие — совокупность мировых точек — приобретает физический смысл, если мы, кроме наращивания тела отсчета, имеем возможность

в каждой точке измерять время, если во всем пространстве, связанном с данным телом отсчета, происходит некоторый периодический процесс, отсчитывающий единое (только для данной системы отсчета!) время. Процесс этот мы будем называть ходом часов. Таким образом, чтобы понятия пространственно-временной точки, и следовательно, и мировой линии, приобрели физический смысл, нам необходима система физических объектов, которую мы можем назвать «четырёхмерным телом отсчета», продолженная бесконечно в четырех направлениях — трех пространственных и четвертом — временном. Градуировка этой системы — расстояния между делениями, нанесенными на твердые тела и интервалы времени, отсчитываемые часами, меняется, если мы данную систему будем рассматривать в другой, отличающейся от нее, движущейся относительно нее, если мы будем рассматривать другую систему как систему отсчета, а данную систему — как движущуюся. Но зависит ли градуировка системы от ее микроскопической структуры?

В автобиографическом наброске 1949 г. Эйнштейн писал:

«Сделаем теперь критическое замечание о теории в том виде, как она охарактеризована выше. Можно заметить, что теория вводит (помимо четырехмерного пространства) два рода физических предметов, а именно: 1) масштабы и часы, 2) все остальное, например электромагнитное поле, материальную точку и т. д. Это в известном смысле нелогично, собственно говоря, теорию масштабов и часов следовало бы выводить из решений основных уравнений (учитывая, что эти предметы имеют атомную структуру и движутся), а не считать ее независимой от них».

Эйнштейн не только заметил фундаментальную проблему физического описания реальности — проблему зависимости релятивистских соотношений, поведения масштабов и часов, от их микроструктуры. Он указал ту сторону дела, которая могла при дальнейшем развитии теории относительности стать основой их выведения из микроструктуры. Эйнштейн считал наиболее важным результатом специальной теории относительности утверждение о зависимости массы тела от его энергии. Масса покоя частицы может перейти в массу, зависящую только от движения частицы, лишенной массы покоя. Иначе говоря, в теории относительности уже содержалась мысль о превращении частиц с ненулевой массой покоя (например, электронов и позитронов) в частицы с нулевой массой покоя (например, в фотоны). Эта мысль была высказана позже, и в 30-е годы понятие трансмутации частиц стало все более фундаментальным понятием физики. Оно выходит за пределы классического идеала науки, так как вводит представление об изменении, не сводимом к изменению положений и скоростей тождественных себе физических объектов.

Все сказанное относится к специальной теории относительности. Чтобы перейти к общей теории относительности, нужно несколько подробнее остановиться на отношении между реальностью и математикой. Специальная теория относительности придала физический смысл числу измерений пространства. Общая теория относительности придала физический смысл геометрической аксиоматике, различию между евклидовой и неевклидовой геометриями.

В своем автобиографическом наброске Эйнштейн рассказывает о том, какое впечатление на него произвело знакомство с геометрией Евклида.

«В возрасте 12 лет я пережил еще одно чудо совсем другого рода: источником его была книжечка по евклидовой геометрии на плоскости, которая попала в мои руки в начале учебного года. Там были утверждения, например, о пересечении трех высот треугольника в одной точке, которые хотя и не были сами по себе очевидны, но могли быть доказаны с уверенностью, исключавшей, как будто, всякие сомнения. Эта ясность и уверенность произвели на меня неопределимое впечатление. Меня не беспокоило то, что аксиомы должны быть приняты без доказательства. Вообще мне было вполне достаточно, если я мог в своих доказательствах опираться на такие положения, справедливость которых представлялась

ние бесспорной. ...Хотя это выглядело так, будто путем чистого размышления можно получить достоверные сведения о наблюдаемых предметах, но такое «чудо» было основано на ошибке. Все же тому, кто испытывает это «чудо» в первый раз, кажется удивительным самый факт, что человек способен достигнуть такой степени надежности и чистоты в отвлеченном мышлении, какую нам впервые показали греки в геометрии».

Эволюция взглядов Эйнштейна на отношение геометрии к реальности соответствовала «филогенетической» эволюции взглядов на указанную проблему. Первое, крайне важное для эволюции научной мысли представление — это представление о логическом совершенстве геометрии. В оксфордской лекции «О методе теоретической физики» (1936) Эйнштейн говорит:

«Мы почитаем древнюю Грецию как колыбель западной науки. Там была впервые создана геометрия Евклида — это чудо мысли, логическая система, выводы которой с такой точностью вытекают один из другого, что ни один из них не был подвергнут какому-либо сомнению. Это удивительнейшее произведение мысли дало человеческому разуму ту уверенность в себе, которая была необходима для его последующей деятельности. Не рожден для теоретических исследований тот, кто в молодости не восхищался этим творением».

Но наука не могла бы развиваться, если бы она в новое время не пришла к абсолютной уверенности в опытном происхождении научных знаний.

«Но чтобы созрели условия для занятий наукой, отражающей действительность, необходимо было установить еще одно положение, которое до Галилея и Ньютона не было общим достоянием философов. Чисто логическое мышление само по себе не может дать никаких знаний о мире фактов, все познание реального мира исходит из опыта и завершается им. Полученные чисто логическим путем положения ничего не говорят о действительности. Галилей стал отцом современной физики и вообще современного естествознания именно потому, что понял эту истину и внушил ее научному миру».

Переход от специальной к общей теории относительности требовал весьма отчетливого представления об аксиомах геометрии, предвосхищающих результаты наблюдения тех или иных физических процессов. Это видно уже в тех весьма кратких положениях общей теории относительности, которые мы встречаем, например, в упоминавшихся работах Эйнштейна «Основы теоретической физики» и «Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики».

В первой из названных работ указаны те пятна на солнце классической физики, которые потребовали для своего устранения нового представления о реальных образах геометрии. Прежде всего классическая механика Ньютона никогда не могла объяснить, почему инерция и тяжесть измеряются одной и той же величиной — массой, почему тяжелая масса пропорциональна инертной, почему, иначе говоря, тела падают с одним и тем же ускорением. С другой стороны, классическая механика, объясняя силы инерции (например, силы, толкающие воду к краям вращающегося ведра) ускоренным движением в абсолютном пространстве, вводила в причинное описание реальности некий фактор — абсолютное пространство, — который действует на тела, но не испытывает воздействия с их стороны. Отсюда вытекало выделение инерциальных систем, как особых систем, в которых только и соблюдаются законы механики. Эйнштейн объявил принципиально неразличимым ускоренное движение системы вне гравитационного поля и инерционное движение в поле тяготения.

Ускорение и тяготение дают физически неразличимые эффекты.

«Общая теория относительности обязана своим происхождением попытке объяснить известный еще со времен Галилея и Ньютона, но не поддающийся никакой теоретической интерпретации, факт: два совершенно отличных друг от друга свойства, инертность и тяжесть, измеряются

одной и той же константой — массой. Из этого соответствия следует, что экспериментально невозможно установить, движется ли заданная система координат ускоренно или она движется равномерно прямолинейно, а наблюдаемые эффекты обусловлены полем тяготения (в этом и состоит принцип эквивалентности общей теории относительности). Введение гравитации разбило понятие об инерциальной системе. Здесь удобно заметить, что инерциальная система является слабым местом механики Галилея — Ньютона, ибо физическому пространству приписывалось некоторое таинственное свойство, обуславливающее вид системы координат, для которой справедливы закон инерции и ньютоновский закон движения».

В статье «Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики» Эйнштейн рассматривает общую теорию относительности как осуществление программы, вытекавшей из теории поля. Она объединяет силы инерции, тяготение и метрику пространства в единое свойство, которое выражает наличие поля, воздействующего на тела и зависящего от тел.

«Последним шагом в осуществлении программы теории поля является общая теория относительности. Количественно она мало меняет теорию Ньютона, но зато она ввела глубокие качественные изменения. Инерция, гравитация и метрическое поведение тел и часов сводится к единому свойству поля, а само поле представлено зависящим от тел (это обобщение закона тяготения Ньютона, или соответствующего ему закона поля в формулировке Пуассона). Пространство и время были лишены, таким образом, не своей реальности, а своей каузальной абсолютности (влияющее, но не поддающееся влиянию), которую вынужден был им приписывать Ньютон для того, чтобы получить возможность выразить известные тогда законы. Обобщенный закон инерции перенял роль закона движения».

Что означает здесь выражение «обобщенный закон инерции»? Классический закон инерции выражает некоторое присущее пространству свойство: пространство само по себе не меняет скорости тела и является в этом смысле однородным, переход тела от одного положения в пространстве к другому положению не вызывает физически регистрируемых эффектов. Такой закон справедлив лишь до тех пор, пока под «положением» в пространстве мы подразумеваем координаты тела в инерциальной системе отсчета. Теперь представим себе, что метрика изменилась, что пространство подчинено неевклидовым метрическим соотношениям, что именно такое изменение метрики вызывает нарушение классического закона инерции в движущейся системе. Тогда для данного, в той или иной мере искривленного, изменившего свои метрические свойства пространственно-временного многообразия сохраняется закон инерции: в данном пространстве система движется без внутренних физических эффектов, регистрирующих такое движение, даже если система не является инерциальной, нарушение классического закона инерции не нарушает обобщенного закона. Обобщенный закон гласит, что тело продолжает двигаться не обязательно прямолинейно и равномерно, а по геодезическим искривленного пространства-времени, которые являются обобщением прямых мировых линий «плоского» пространства-времени.

В этом смысле общая теория относительности была выполнением «программы Ньютона» (так Эйнштейн называл стремление вывести все детали картины мира из схемы взаимодействующих тел) и «программы Максвелла» (так Эйнштейн называл развитие дифференциального представления о взаимодействии тел в концепции физически реального поля). Но общая теория относительности, как и другие теории поля, не смогли объяснить дискретную природу вещества.

«Эта неудача, — говорит Эйнштейн об общей теории относительности, — связана, очевидно, с тем, что она до сих пор ничем не способствовала пониманию квантовых явлений. Чтобы понять эти явления, физики вынуждены принять совершенно новые методы...»

При жизни Эйнштейна, когда речь шла об его отношении к квантовой механике, в центре внимания оказывались критические выступления против основ квантовой механики, начавшиеся в конце 20-х годов и продолжавшиеся до смерти мыслителя. В основе лежала эйнштейновская концепция физического описания реальности. В этом отношении очень характерна статья, написанная Эйнштейном и его учениками В. Подольским и Н. Розеном в 1935 г. и озаглавленная: «Можно ли считать, что квантовомеханическое описание физической реальности является полным?».

Эта статья начинается формулировкой исходного и непоколебимого утверждения:

«При анализе физической теории необходимо учитывать различие между объективной реальностью, которая не зависит ни от какой теории, и теми физическими понятиями, с которыми оперирует теория».

Полнота физического описания определяется так: «... каждый элемент физической реальности должен иметь отражение в физической теории». Квантовомеханическое состояние может считаться понятием, полностью описывающим реальность, если оно позволяет точным и достоверным образом предсказать значение некоторой физической величины. Квантовая механика не может этого сделать. Возьмем две взаимодействующие системы. Зная состояния этих систем в момент взаимодействия, мы не можем узнать, в каком состоянии они будут находиться после прекращения взаимодействия. Мы измеряем после прекращения взаимодействия координаты одной системы и не можем получить точного значения импульса другой системы. Таким образом, без реального взаимодействия измерение, произведенное над первой системой, вызывает изменение квантовомеханического состояния второй системы. «Мы видим, — пишут Эйнштейн, Подольский и Розен, — что в результате двух различных измерений, произведенных над первой системой, вторая система может оказаться в двух разных состояниях, описываемых различными волновыми функциями. С другой стороны, так как во время измерения эти две системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций над первой системой, во второй системе уже не может произойти никаких реальных изменений. Это, конечно, является лишь другой формулировкой того, что понимается под отсутствием взаимодействия между двумя системами. Таким образом, одной и той же реальности (вторая система после взаимодействия с первой) можно сопоставить две различные волновые функции...»¹

Если импульс и координаты частиц обладают объективной реальностью, то квантовомеханическое описание не является полным описанием. Нильс Бор в статье под тем же названием «Можно ли считать, что квантовомеханическое описание физической реальности является полным?» разобрал парадокс двух, сначала взаимодействующих, а затем разобщенных систем и показал, что в квантовой механике существует иной критерий полноты физического описания. Физическое описание микромира не может избежать классического представления об объекте, к которому мы не подходим с такими же требованиями, как и к квантовому объекту, не учитывая его двойственную корпускулярно-волновую природу. «Фундаментальная важность различия между объектом и прибором в квантовой теории обусловлена, как мы видели, тем, что для толкования всех измерений в собственном смысле необходимо пользоваться классическими представлениями, несмотря на то, что классическая теория не может сама по себе объяснить те новые закономерности, с которыми мы имеем дело в атомной физике»².

В дискуссии Бора с Эйнштейном очень отчетливо было сформулировано позитивно-классическое содержание квантовой механики: принцип неопределенности позволяет применять к микромиру классические понятия. Дискуссия вообще способствовала развитию квантовой механики. Нильс Бор

¹ «Успехи физических наук», т. 16, 1936, стр. 444.

² Там же, стр. 456.

говорил в 1961 г. о дискуссии: «Ответы на многие вопросы, в свое время вызывавшие ожесточенные дискуссии, в наши дни известны каждому начинающему. А мне хочется сегодня, когда Эйнштейна уже нет с нами, сказать, как много сделал для квантовой физики этот человек с его вечным, неукротимым стремлением к совершенству, к архитектурной стройности, к классической законченности теорий, к единой системе, на основе которой можно было бы развить всю физическую картину. В каждом новом шаге физики, который, казалось бы, однозначно следовал из предыдущего, он отыскивал противоречия, и противоречия эти становились импульсом, толкавшим физику вперед. На каждом новом этапе Эйнштейн бросал вызов науке, и не будь этих вызовов, развитие квантовой физики надолго бы затнулось»¹.

Сейчас, ретроспективно, мы все больше убеждаемся, что критика Эйнштейна способствовала переносу центра тяжести квантовой механики на проблему тела взаимодействия, как условия применения классических понятий к микромиру. Эта проблема оказалась связанной с фундаментальной проблемой теории относительности — проблемой тела отсчета, позволяющего придать физический смысл положению тела в пространстве.

Нельзя думать, что Эйнштейн считал квантовую механику в какой-то мере неправильным описанием реальных процессов в микромире. Мысль Эйнштейна гораздо сложнее, она непосредственно связана с его концепцией последовательного приближения ко все более общим исходным принципам, лежащим в основе гармонии мироздания. Мы уже коснулись этой концепции и вскоре остановимся на ней подробнее. Сейчас придется сказать несколько слов о позиции Эйнштейна в вопросе о связи между исходными абстрактными понятиями, из которых выводятся сопоставимые с опытом заключения, и самим опытом. Эти абстрактные понятия не вытекают однозначным образом из конкретных, отдельных опытов. Но они должны в максимальной степени соответствовать всей сумме известных нам фактов и наталкивать мысль на новые эксперименты, которые однозначным образом подтвердят или отвергнут наши предположения, придадут физический смысл исходным понятиям или лишат их физического смысла. Наука ищет максимального логического единства исходных понятий. Она не удовлетворяется существующей системой таких понятий и ищет новую систему с более общими исходными допущениями, но в этой новой системе встречаются допущения, еще не получившие выхода в область наблюдений, еще не имеющие связей с возможными экспериментами. Наука ищет такие связи. Вместе с тем она ищет еще более стройную и логически единую, исходящую из еще меньшего числа исходных понятий общую схему. Речь идет, очевидно, об уже известных нам критериях «внешнего оправдания» и «внутреннего совершенства». Когда наука не удовлетворена логической стройностью существующей картины мира, она ищет новую систему. «Чтобы устранить этот недостаток, изобретается система с меньшим числом понятий и соотношений, система, в которой первичные понятия и соотношения «первого слоя» сохраняются в качестве производных. Эта новая «вторичная система», которая характеризуется большим логическим единством, содержит зато только такие собственные элементарные понятия (понятия второго слоя), которые прямо не связаны с комплексами чувственных восприятий. Продолжая усилия для достижения логического единства, мы приходим, как следствие вывода понятий и соотношений второго слоя (и косвенно первого слоя), к третичной системе, еще более бедной первичными понятиями и соотношениями. История так продолжается до тех пор, пока достигнем наибольшего мыслимого единства и наименьшего числа понятий в логической основе, которое еще совместимо с наблюдениями наших чувств».

Дойдет ли наука до окончательного результата в поисках все более стройной схемы бытия? «Если интересуются моим мнением, — пишет

¹ «Наука и жизнь», 1961, № 8, стр. 73.

Эйнштейн, — то я склонен ответить отрицательно. Однако, борясь с трудностями, мы никогда не оставим надежды, что эта цель, величайшая из всех, действительно может быть в очень большой степени достигнута. Это не будет окончательным результатом, но это будет решением, содержащим достоверные данные, и вместе с тем логически стройным, исходящим из небольшого числа исходных допущений.

Об этой схеме — идеале научного исследования — и идет речь. Являются ли квантово-статистические представления идеальными для современного ученого ответом на вопрос: «каковы наиболее общие исходные закономерности бытия»? Не может ли наука предположить, что за квантово-статистическими закономерностями, скрываются иные, более общие?

Нужно подчеркнуть, что Эйнштейн ни на минуту не сомневался в том, что квантовая механика это «вторичная система» по отношению к классической картине мира, что она обладает и большей логической стройностью и большим «внешним оправданием». Это следует подчеркнуть, чтобы отбросить мысль об Эйнштейне как о стороннике «классического реванша», идеи «скрытых параметров», или какого-либо другого возврата к идеям определенных в одном эксперименте координат и импульса частицы. Приведем характеристику квантовой механики и представления о волновой функции как о мере вероятности динамической переменной, изложенную Эйнштейном в «Основах теоретической физики». Здесь рассказана история квантовых идей и изложение доводится до неудачи «классического» понимания волнового уравнения, как описания определенного движения частицы. Эйнштейн пишет об идеях де Бройля и Шредингера.

«На основе этой теории удалось удивительно хорошо представить огромное разнообразие фактов, которые иначе казались совершенно непостижимыми. Но, странная вещь, его постигла одна неудача: оказалось невозможным ассоциировать с этими волнами Шредингера определенные движения материальных точек — а ведь именно в этом состояла первоначальная цель всего построения. Трудность казалась непреодолимой, пока ее не победил Борн способом столь же простым, сколь и неожиданным. Волновые поля Л. де Бройля — Шредингера не должны были трактоваться как математическое описание реального протекания события во времени и в пространстве, хотя они действительно имеют отношение к такому событию. Они являются скорее математическим описанием того, что мы можем в действительности знать о системе. Они служат только для представления статистических высказываний и предсказаний относительно результатов всех измерений, которые можно произвести над системой».

Далее следует очень ясное и вполне категорическое отрицание возможности классического реванша и столь же ясное утверждение: квантово-статистическая концепция вошла в число исторически инвариантных достижений физической мысли.

«Надо признать, что новая теоретическая концепция обязана своим происхождением не влечет фантазии, а непреодолимой силе опытных фактов. Все попытки представить частицу и волновые свойства, проявляющиеся в явлениях, связанных со светом и веществом, непосредственно пространственно-временной моделью до сих пор кончались неудачно. Как убедительно показал Гейзенберг, всякое утверждение о строго детерминистической структуре природы с эмпирической точки зрения окончательно исключается из-за атомистического строения приборов, применяемых в наших экспериментах. Очевидно, никакое будущее познание не сможет заставить физиков отказаться от нашего современного статистического теоретического обоснования физики в пользу детерминистического обоснования, которое изучало бы непосредственно физическую реальность».

Как же понимать в таком случае последние строки «Основ теоретической физики» с надеждой на появление нестатистической общей концепции в физике? «Некоторые физики, среди которых нахожусь и я сам, — пишет Эйнштейн, — не могут поверить, что мы раз и навсегда должны отказать от идеи прямого изображения физической реальности в простран-

стве и времени, или, что мы должны согласиться с мнением, будто явления в природе подобны игре случая. Каждому дозволено выбрать направление приложения своих усилий, и каждый человек может найти утешение в прекрасном изречении Лессинга, что поиски истины значительно ценнее, чем обладание ею».

Если квантовая механика объясняет всю сумму существующих экспериментальных данных, то каким может быть механизм «перехода в следующий слой», переходя к более общим допущениям, находящимся сначала интуитивно, потом более строгим образом, новые экспериментальные подтверждения, новые линии «внешнего оправдания»? Речь может идти о принципиально новой области явлений природы. Именно в таком направлении — к более общей теории, с более общими исходными принципами, с новыми сферами экспериментальной проверки и толкала науку физическая интуиция Эйнштейна.

От каких посылок нужно отказаться, чтобы получить более общую теорию? Вчитываясь в работы Эйнштейна, в частности в собранные в этой книге статьи, начинаешь видеть контуры новой теории, которые рисовались Эйнштейну. Они были неопределенными, они не могли быть иными, они и сейчас еще не могут стать определенными. Но совершенно определенным является неклассический характер позиции Эйнштейна. В оксфордской лекции «О методе теоретической физики» Эйнштейн говорил о том, что полная пространственная локализация частицы должна быть оставлена и вернуться к ней нельзя. «Я уверен, что в теоретической модели надо оставить мысль о полной локализации части. Мне это кажется прочным результатом соотношения неопределенностей Гейзенберга. В континуальной теории атомистический характер интегральных законов может быть выражен удовлетворительно без локализации элементов, составляющих атомистическую структуру. Только если удастся такое изложение атомистического строения, я буду считать квантовую загадку разрешенной».

«Полная локализация частицы» — одно из краеугольных допущений классической картины мира. В теории относительности она гарантируется постулатом твердого или квазитвердого тела отсчета, которое в принципе может быть дополнено другими соприкасающимися с ним телами и стать системой отсчета. В квантовой механике локализация частицы гарантируется постулатом классического тела взаимодействия, тела, по отношению к которому мы отказываемся от учета корпускулярной структуры и корпускулярно-волнового дуализма (причем такое тело взаимодействия — классический макроскопический объект — в принципе не может определить импульс частицы).

Отказаться от локализации частицы — это значит признать возможность таких явлений, при анализе которых нельзя рассматривать одно поле как нечто дискретное, как множество квантов, а другое поле считать континуальным, не распространять на него квантовую детализацию. Такими явлениями служат сильные взаимодействия полей, связанные с высокими энергиями частиц. При анализе подобных взаимодействий необходимо учитывать и квантовые и релятивистские закономерности. Но у нас нет еще единой квантово-релятивистской концепции частиц.

Что дают работы Эйнштейна современному физiku, который ищет такую концепцию? Главным, по-видимому, является удивительная способность Эйнштейна отойти от любого допущения, если оно оказывается противоречащим фактам и требованию максимальной физической стройности теории. Эйнштейн с большим внутренним сопротивлением относился к квантово-статистическим закономерностям, как к наиболее общим и фундаментальным закономерностям бытия. Он надеялся на появление более общей нестатистической теории. Но эта надежда не становилась априорным запретом иной перспективы. В конце статьи «Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики» Эйнштейн говорит о наиболее общих посылах ньютоновой механики: каузальной зависимости движения тел от других тел и о дифференциальном характере законов природы. Они

связаны друг с другом: каузальная связь означает у Ньютона полную определенность локализации частицы в каждый момент, а дифференциальный характер закона также соответствует принципиальной возможности указать положение частицы в каждый момент и таким образом проследить ее движение от точки к точке и от мгновения к мгновению. Квантовая механика ограничивает эти посылки. «Но кто осмелится сегодня разрешить вопрос о том, нужно ли окончательно отказаться от дифференциального и каузального законов, этих последних предпосылок ньютоновской концепции природы?»

Таким образом, вопрос остается открытым. В чем же состоит *незыблемая* основа науки, во имя которой, может быть, придется отказаться от наиболее общих ньютоновых посылок? Это — соответствие теории наблюдения и логическая стройность теории. Указанные критерии означают единую посылку: физическое описание — это каузальное описание реальных процессов. Единичные наблюдения не дают каузальной картины природы. «Но до тех пор, пока принципы, могущие служить основой для дедукции, не найдены, отдельные опытные факты теоретику бесполезны, он не в состоянии ничего предпринять с единичными эмпирически установленными общими закономерностями. Наоборот, он застывает в беспомощном состоянии перед единичными результатами эмпирического исследования до тех пор, пока не раскроются принципы, которые он сможет сделать основой для дедуктивных построений».

Значит, речь идет о том, чтобы включить единичные наблюдения в универсальную схему каузальной гармонии мироздания, максимально исключив специальные, частные, логически неоднозначные допущения. Это стремление — не только определенная логическая презумпция, но и эмоциональная настроенность, исключение всего личного (в том числе личных симпатий, надежд и опасений) — является существенной компонентой того ускорения научной мысли, которое заключено в работах Эйнштейна.

В. Г. Кузнецов

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

Свою «Творческую автобиографию» Эйнштейн начинает словами:

«Вот я здесь сижу и пишу на 68-м году жизни что-то вроде собственного некролога».

Что же вынудило его взяться за «некролог»?

«Делаю я это не только потому, что меня уговорили; я и сам думаю, что показать своим ищущим собратьям, какими представляются, в исторической перспективе, собственные искания, — дело хорошее».

Он говорил, что история физики для него «это — драма, драма идей». К собственной жизни он подходил с тем же критерием. «Главное в жизни человека моего склада заключается в том, что он думает и как он думает, а не в том, что он делает или испытывает». Поэтому автобиография Эйнштейна мало похожа на обычную автобиографию: в ней почти нет дат и внешних событий, это скорее *автобиография мысли*. А между тем она заслуживает того, чтобы над ней подумать...

Ученый прожил большую и сложную жизнь. Он был не только свидетелем, но и участником многих важных событий своего нелегкого времени.

Детство и отрочество Эйнштейна протекали в Германии «железного канцлера» Бисмарка. Его старость омрачила трагедия Хиросимы. Он пережил две мировых войны и фашизм. В дни его молодости начался великий кризис классической физики.

Альберт Эйнштейн родился весной 1879 года в Ульме — старинном, некогда крепостном городе с самым высоким в Германии протестантским собором. Дунай, только что вырвавшийся из предгорий Швабских Альп, здесь еще узок и стремителен.

Зимой 1880 года семья Эйнштейнов переехала в Мюнхен. Альберт рос ребенком тихим, с медлительной речью, раздражавшей учителей. Он не участвовал в шумных играх, не интересовался спортом, а жил в мире своих грез. Он рано полюбил музыку, сочинял песенки и распевал их, когда думал, что его не слышат. Мальчику было пять лет, когда ему подарили компас. Игрушка буквально его заворожала. И он сделал первое свое научное открытие: «За вещами должно быть что-то еще, глубоко скрытое...»

Принято считать, что музыкальный талант он унаследовал от матери; отец передал ему способности к наукам. В себе эти способности он вынужден был подавлять. В молодости он очень хотел учиться, но материальное положение семьи не позволяло и думать об этом. После реального училища пришлось заняться практическими делами: Герман Эйнштейн открывал

то мастерскую электрических приборов, то электротехнический магазин. И всегда еле сводил концы с концами, однако духом не падал, был бодр и деятелен.

В гимназии, куда Альберта отдали после начальной школы, учили латынь и греческий, исторические хронологии, там царил казарменный муштра. Учителя, напоминавшие фельдфебелей, обращались с учениками как с солдатами. Альберт возненавидел не только гимназию, но и все военное, даже военные оркестры. Временем «умственной школьной рекрутчины» называл он потом эти годы.

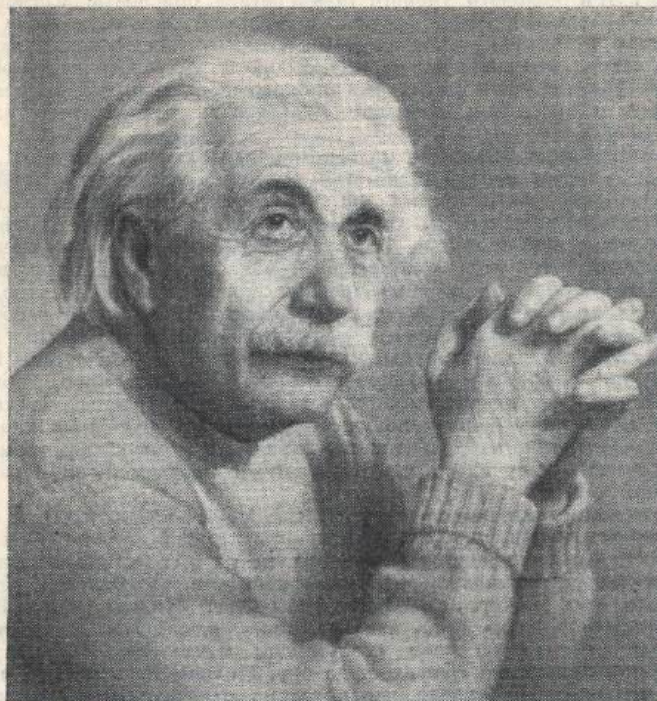
Немецкая пословица утверждает, что уроженцы Ульма хорошие математики. В двенадцать лет Альберту попала книжечка по геометрии Эвклида. Она произвела на него впечатление чуда. «Тот не рожден для теоретических исследований, кто в молодости не восхищается этим творением», — скажет Эйнштейн впоследствии о геометрии Эвклида. Он легко усвоил не только основы геометрии, но и дифференциальное и интегральное исчисление. Но наставники видели в нем скромную посредственность. «Из вас, Эйнштейн, никогда ничего путного не выйдет», — без обиняков заявил учитель немецкого языка.

Гимназию Альберту кончить не пришлось. В один прекрасный день куратор предложил ему покинуть учебное заведение. Тихий Альберт с годами становился все более язвительным (недаром любимым его поэтом в ту пору был Гейне); он не признавал авторитетов, для него не существовало условностей. Он говорил то, что думал и высмеивал все то, что казалось ему смешным. Учителя решили избавиться от строптивого гимназиста. Сыграл тут роль и антисемитизм, уже дававший тогда себя знать. Альберт собрал вещи и отправился в Милан, где в ту пору жили его родители и младшая сестра Майя. Коммерческие дела отца шли очень плохо. Чтоб хоть чем-то его утешить, Альберт решил поступить в высшую школу. Родные посоветовали избрать инженерное поприще, поскольку рассчитывать — без гимназического аттестата — на университет было бы неразумно.

Но и в Technische Hochschule — цюрихский Политехникум — Эйнштейн тоже не поступил: блестяще сдал математику, но срезался на языках и естественных науках. Ректор, плененный математическими познаниями юноши, посоветовал ему закончить одну из швейцарских средних школ. Он же рекомендовал и школу — в небольшом городке Аарау, который издавна славился образцовыми средними учебными заведениями. Эйнштейн послушался. В кантональной школе, которую он стал посещать, «веял свежий ветер скептицизма». Новичок хорошо учился, недурно — и с упоением — играл на скрипке и всегда был весел, как птица. Одного он избегал: пирушек. «Пиво делает людей глупыми и ленивыми», — сказал Бисмарк. И это было единственное, в чем юноша-Эйнштейн был солидарен с канцлером.

Его студенческая жизнь началась в октябре 1896 года. Эйнштейн избрал педагогический факультет, на котором готовили учителей математики и физики. За десять лет до рождения Эйнштейна это же учебное заведение окончил Рентген. Политехникум имел таких превосходных преподавателей, как Гурвиц, Гайзер и Герман Минковский. Минковский впоследствии прославился тем, что создал математический аппарат теории относительности. Впрочем, Эйнштейн почти не посещал лекций Минковского; зато он увлекался физической лабораторией «и со священным рвением штудировал дома корифеев теоретической физики» — Максвелла, Гельмгольца, Кирхгофа, Больцмана. Математика отпугивала его тем, что имела множество специальных областей, каждая из которых способна взять «всю отпущенную нам короткую жизнь». В физике же он «скоро научился выискивать то, что может повести в глубину, и отбрасывать все остальное, все то, что перегружает ум и отвлекает от существенного». В физике он чувствовал себя как рыба в воде.

Политехникум Эйнштейн окончил весьма успешно. Но за ним плелась слава недисциплинированного и своевольного студента. Профессор физики



Альберт Эйнштейн в последние годы жизни

Г.-Ф. Вебер не пожелал оставить его у себя на кафедре. Вебер был приверженцем старых принципов физики, которая для него остановилась на Гельмгольце. Читал он великолепно, но Эйнштейн его лекции не любил, ходил только на практические занятия. Обида усугублялась тем, что Эйнштейн величал его «господином Вебером» и никогда — «господином профессором». Эйнштейн так потом объяснял причину первого неуспеха в жизни: «Я был третируем моими профессорами, которые не любили меня из-за моей независимости и закрыли мне пути в науку». Пилюля оказалась горькой не только потому, что все однокурсники Эйнштейна были оставлены на разных кафедрах, но и потому, что молодой педагог около двух лет оставался без работы, перебиваясь случайными уроками и живя впроголодь. «Год был труден, — вспоминал он. — Нужда была так остра, что я не мог размышлять ни над одной абстрактной проблемой». Питаясь на грощи, он нажил себе болезнь печени, досаждавшую ему потом всю жизнь. Однако оптимизм его не иссякал. «Я веселый заябик и не способен предаваться меланхолии!» И лишь в письмах к друзьям, да и то шутя, он именовал себя «неудачником».

Вообще юмор в жизни Эйнштейна сыграл роль чрезвычайно важную. Защищаясь, ученый пользовался им как своего рода зонтиком, а когда атаковал, то отнюдь не безобидно. В такие минуты в его «глазах ангела... появлялись чертики». «Юмор и скромность создают равновесие», — говорил Эйнштейн. Друзья любили незлобивый юмор ученого, а его ироничность и прямота добыли ему немало врагов.

Между тем молодого ученого подстерегала опасность; к счастью, он ее вовремя разглядел. «Еще будучи желторотым юнцом, я живо осознал ничтожество тех надежд и стремлений, которые гонят сквозь жизнь большинство людей, не давая им отдыха. Скоро я увидел и жестокость этой гонки, которая, впрочем, в то время прикрывалась тщательнее, чем теперь, лицемерием и красивыми словами. Участвовать в этой гонке заставлял человека желудок...»

Летом 1902 года Эйнштейн по рекомендации своего товарища Марселя Гроссмана (впоследствии тот помогал ему при разработке общей теории относительности) был принят на должность «технического эксперта третьего класса» в патентное бюро города Берна. Это учреждение, называвшееся тогда еще и «Бюро духовной собственности», не насчитывало даже тридцати служащих. Эйнштейн умел легко и быстро выявлять сущность различных инженерных проблем, заключения писал ясно, кратко, логично. Он правился директору, а ему приходилось по душе работа. «Она принуждала к многостороннему мышлению», писал ученый впоследствии, — а также давала импульс для физических размышлений. Наконец, практическая профессия вообще является благословением для таких людей, как я». Его идеал тех дней — выбиться из нужды, иметь, пусть скромное, но прочное положение. Он получал около десяти франков в день и считал себя богачом. Отрабатыв положенные восемь часов, он мог заниматься физикой. (Случалось, что, увлеченный проблемой, он и на службе что-то дописывал...)

Вскоре Эйнштейн женился на Милеве Марич, бывшей своей однокурнице, сербiance. Из окна их квартирки открывался великолепный вид на Бернские Альпы и долину реки Аара, но их быт сильно отдавал духом богемы. (Не о такой невестке мечтали родители «Альбертия». Отец дал согласие на этот брак только на смертном одре.) Милева родила Эйнштейну двоих сыновей. Она была неврастенична, ревнива и недоверчива, но, как умела, неслась о своем «полунинцем мечтателе», мысли которого витали в таких высоких сферах, куда она, Милева, не в силах была залезть. Эйнштейн пронизировал, что в теории относительности он развешивает часы в каждой точке пространства — кроме собственного жилета. Милева мужественно переносила бедность. Одно время ей даже приходилось готовить обеды «для студентов профессора Эйнштейна». «Весь день, — жаловалась она, — я стираю и стряпаю и так устаю к вечеру, что не могу даже прочесть научный журнал». Со временем нужда миновала. В 1909 году Эйнштейн стал экстраординарным (то есть внештатным) профессором Цюрихского университета, затем, переехав в Прагу в качестве ординарного профессора, несколько улучшил свое положение; в 1912 году он снова возвратился в Цюрих, но не в университет, а в Политехникум. Весной 1914 года, когда Эйнштейн, избранный действительным членом Прусской академии наук (ее возглавлял Макс Планк), переехал в Берлин, они с Милевой расстались — все же это были слишком разные люди... В Берлине Эйнштейн возглавил институт физики «общества кайзера Вильгельма» и читал лекции по теоретической физике. Через пять лет, получив развод, он женился на Эльзе Эйнштейн, своей троюродной сестре.

Эйнштейна, кажется, на всю жизнь обидело то, что профессор Вебер не взял его в ассистенты. А ведь это был именно тот случай, по пословице, когда несчастье помогло счастью. Ученый на несколько лет оказался в идеальных для своего таланта условиях — в одиночестве. Это предохранило от избитых дорог и от чуждого его духу воздействия.

Удача была и в том, что в своем одиночестве Эйнштейн все-таки не был одинок. Тут следует добрым словом помянуть «благословенную академию Олимпиа» — как Эйнштейн и его друзья окрестили свой бернский кружок. Молодые люди, чаще всего — трое: Эйнштейн, Габиэт и Соловин — собирались по вечерам, обедали, читали — физиков и философов (Спинозу, Канта, Юма), романы и даже стихи, спорили, слушали игру Альберта на скрипке. Он исполнял Баха и Гайдна, Шуберта и Моцарта — с детства

и всю жизнь нежно любимого Моцарта! Накануне воскресного дня они совершали ночные прогулки в горы (в таких случаях беседы и споры не утихали до рассвета); наблюдали восход солнца, завтракали в каком-нибудь ресторанчике и возвращались домой, усталые и радостные. Так продолжалось года три — пока друзья не разъехались. «Хорошее было тогда время в Берне, когда мы учредили нашу веселую академию, которая была менее ребяческой, нежели те почтенные академии, с которыми я близко познакомился позднее», — писал Эйнштейн Морису Соловину сорок пять лет спустя. А еще позже, перед смертью — и снова в мыслях возвращаясь к «Олимпиа»: «Тебе наша преданность и привязанность до последнего высокоученого вздоха».

Вскоре после окончания Политехникума Эйнштейн начал печататься в одном из лучших научных журналов того времени «Annalen der Physik» (небольшые желтые книжечки, выходившие раз в месяц). В 1905 году он — одну за другой — опубликовал там пять статей: о новом определении размеров молекул, о квантовой теории света, о броуновском движении, затем — в № 17, страница 891 — «К электродинамике движущихся тел», а в № 18 — совсем маленькую статью, посвященную формуле $E = mc^2$. Каждая из этих статей — своего рода шедевр, но особая участь была уготована двум последним: простая с виду формула $E = mc^2$ открывала атомную эру, стала потом главной формулой нашего века, а в статье «К электродинамике движущихся тел» на тридцати страницах было изложено то, что вскоре получило название *специальной теории относительности*.

Эйнштейн сам указывал на значение для него работ Лоренца («Теория Максвелла — Лоренца неизбежно вела к специальной теории относительности») и на преемственность своей теории («Без введения Фарадеем и Максвеллом понятия электромагнитного поля теория относительности была бы невозможна»).

Но то, что сделал Эйнштейн, по-настоящему поразительно. Ему только-только исполнилось 26 лет. Он слыл за человека, «не подающего надежды», он не изучал физику в каком-либо знаменитом университете и не был связан ни с одной физической школой, никто им не руководил, не направлял его. («До 30 лет, — вспоминал он, — я не видел настоящего физика».) Он не блистал ни памятью, ни особенной эрудицией. Так, он на всю жизнь поразила Макса Планка, когда заявил, что не помнит, чему равна скорость звука в воздухе. «Зачем помнить то, что есть в любом справочнике?» Впоследствии он говорил: «Подлинной ценностью является, в сущности, только интуиция». Историки до сих пор разводят руками: откуда, собственно, взялся Эйнштейн, что сделало Эйнштейна Эйнштейном? Почему теорию относительности открыл, например, не Лоренц, не Пуанкаре, которые тоже двигались в этом направлении, а какой-то «мелкий чиновник патентного бюро», «эксперт третьего класса»?

Сила гениальности Эйнштейна в том, что она вооружила его новым методом исследования.

О науке того времени он писал: «Несмотря на то, что в отдельных областях она процветала, в принципиальных вещах господствовал догматический застой».

Эйнштейн же мыслил и действовал не так, как было «принято», «договорено», а так, как подсказывало ему его чутье физической сущности. Он был парадоксален и смел. Решительно встав на совершенно новую точку зрения, он порвал с привычными представлениями о пространстве и времени и не робел, получив странные, а то и вовсе, казалось бы, нелепые результаты.

Он еще в кантональной школе в Аарау задумался над вопросом: что произойдет, если тело станет двигаться со скоростью света?.. Электрическое поле словно бы застынет. Гребни и впадины его будут чередоваться в пространстве, но не будут сдвигаться с течением времени... С того и началась теория относительности.

Молодой ученый поднялся до таких высот теории, что поставить рядом с ним буквально некого. Он подарил миру самую отвлеченную из когда-либо существовавших теорий, но она, тем не менее, ознаменовала собой «совершеннолетие науки». Физика отныне стала делиться на «до- и после-эйнштейновскую».

Жизнь же самого Эйнштейна-ученого отчетливо делится на три больших этапа.

К 1905 году он создал так называемую специальную теорию относительности.

В 1908—1916 годах была разработана общая теория относительности. Но Эйнштейн считал, что тяготение и электромагнетизм — суть частные проявления некоего единого поля. Разработке теории этого поля он посвятил почти половину жизни — три последних десятилетия.

А между тем слава Эйнштейна росла. Во время солнечного затмения 29 мая 1919 года экспедиция, возглавляемая английским астрономом и физиком Артуром Эддингтоном, измерила предсказанное Эйнштейном отклонение луча света вблизи диска солнца. То был великий триумф теории относительности. Дж. Дж. Томсон на заседании Королевского общества сказал о ней: «Это открытие не отдаленного острова, а целого континента научных идей. Это величайшее открытие со времен Ньютона».

В 1922 году Эйнштейну была присуждена Нобелевская премия. Он был избран членом десятков и десятков академий и научных обществ всех стран мира. Его слава перелилась за пределы научных кругов, она росла по закону еще не открытой тогда ценной реакции. Ни один ученый никогда не пользовался такой широкой, можно сказать легендарной, известностью. Позже это очень хорошо выразила девочка из Британской Колумбии: «Я Вам пишу, чтобы узнать, существуете ли Вы в действительности».

Эйнштейн сделался своего рода достопримечательностью Берлина. В его квартиру на Габерландштрассе, 5 со всего света и на разных языках приходили письма. Эйнштейн жаловался: «Мне снится по ночам, что я жарюсь в аду, а наш почтальон — это сам сатана; он орет на меня и швыряет мне в голову новые связки писем за то, что я еще не ответил на старые». А тут еще всяческие обязательные визиты, бессмысленные заседания. Много позже, но в ситуации аналогичной, ученый писал: «Время для размышлений и работы мне приходится буквально красть, как профессиональному вору». «Период величия» совсем измотал его. «Я стал простой византок самых убогих рефлекторных движений». Любимый разражаться шутливыми стихами, Эйнштейн на одной из своих фотографий, присланных охотником за автографами, написал:

Где бы ни пролег мой след,
Всюду вижу свой портрет:
На столе и на стене
И на банте, что на мне.
Дяди, тети там и тут
Все автографы берут...

И с тревогой заключает: уж не свихнулись ли мы все вместе?.. Известны его слова: «Все, что было связано с личным культом, мне всегда было крайне неприятно».

В эти годы все крепла его дружба с Планком. То была контрастная пара: молодой коренастый Эйнштейн, с густой копной вьющихся волос, всегда веселый, насмешливый и Планк — сухопарый, стареющий, лысый, с беспомощными близорукими глазами, нескладный и рассеянный. Планк раньше других понял важность для науки и внутреннюю красоту теории относительности. Их с Эйнштейном связывала не только физика, но и страстная любовь к музыке. Доставая скрипку, Эйнштейн сразу серьезнел. Планк, нервно потирая тонкие руки, садился за рояль. Иногда они играли в четыре руки. Их дуэты продолжались часами. Моцарт, Брамс, Бетховен, Скрябин, а то и просто импровизация. Ученые словно бы обменивались

мыслями, они отлично понимали друг друга без формул... Когда Эйнштейн хотел как-то по-особому отметить физическую концепцию, он говорил: «Музыкальность мысли». Этим комплиментом, несомненно рожденным в минуту вдохновенного музицирования, Эйнштейн награждал не так-то часто. И, кажется, первым, кто его заслужил, был молодой Нильс Бор — «человек с гениальной интуицией и тонким чутьем». «Это — наивысшая музыкальность мысли», — сказал Эйнштейн о ранних работах Бора.

Эйнштейн никогда не ставил перед собой легких задач. Решенные им задачи — это задачи титана, «замыслы микеланджеловской мощи». Хотя ученый и уверял, что он-де «человек не трудолюбивый» и что у него «тугое перо», однако работоспособность его поразительна. Им написано более шестисот статей и — на самые разные темы (из них чисто научных — около половины). Он не очень умел отдыхать, зато умел работать в любых условиях.

..Вот молодой Эйнштейн, рассеянно катящийся по людной улице детскую коляску со своим первенцем. В самом неподходящем месте он вдруг останавливается, достает бумагу и карандаш и начинает что-то быстро записывать...

..А вот что рассказывает один из его студентов. «Назавтра я побывал у него. Он сидел в своем рабочем кабинете, перед ним лежали листы бумаги, испещренные математическими формулами. Держа на левой руке своего младшего сына Эдуарда, он писал правой рукой и между делом отвечал на вопросы, которые время от времени задавал ему старший сын Альберт, игравший тут же в кубики... Я увидел, как сосредоточенно он умел думать».

..А вот, надвинув на лоб широкополую шляпу, самоутопленный и озабоченный чем-то своим, внутренним, Эйнштейн прохаживается по мосту через Шпрее. Моросит дождь — ученый его не замечает. Бумажка, на которой он что-то набрасывает, промокла. У него свидание со студентом, но тот не из пунктуальных. Впрочем, на лице профессора нет и тени досады. Неужели ему не жаль потерянного времени? Ничуть. Свою работу он может делать, где угодно. Вот и сейчас его осенила блестящая мысль...

..И даже впоследствии, в Принстоне, когда умерла его жена Эльза, он, полный мрачных предчувствий, сидел наверху, в кабинете, и работал. Мозг его почти не знал отдыха, и это было привычное состояние. Ученому не могла помешать ни дружеская беседа за столом, ни прогулка на яхте (единственный вид спорта, которым он иногда занимался), ни чтение газеты, ни трамвайная толчака... Это отмечал Луначарский: «Глаза у Эйнштейна близорукие, рассеянные. Кажется, что уже давно и раз навсегда больше половины его взоров обратились куда-то внутрь... Глаза поэтому полны абстрактной думой и кажутся даже немного грустными».

Он никогда не любил лекций и очень любил дискуссии, живые беседы. «Его творческий процесс», — пишет Антон Рейзер, биограф ученого, — всегда происходил не столько за письменным столом, сколько в беседе. Его излюбленной формой изложения и обтачивания новых идей является не рукопись, но разговор с коллегами у грифельной доски с мелом в руках».

Когда его спрашивали, где его инструменты, он предъявлял стило, которое имел обыкновение носить за воротником фуфайки; когда спрашивали, где его лаборатория, он, улыбаясь, показывал на свой лоб.

Высок был и накал его гражданского темперамента. В статье «Почему социализм?» 70-летний ученый писал: «Смысл жизни, как бы коротка и опасна она ни была, можно найти только в служении обществу».

По натуре Эйнштейн не был бойцом. Интересно, что он, например, недолюбливал шахматы. «В этой одухотворенной игре меня отталкивал дух борьбы за выигрыш».

Он преклонялся перед Галилеем и Кеплером, благоговел перед подвигом их жизни. Замкнутый и вечно погруженный в свои уединенные

размышления Кеплер по своему научному темпераменту был ему ближе, чем пламенный боец Галилей. «Он рисовался мне пиним,— писал Эйнштейн Макс Броду, автору романа «Галилей в плену».— Он страстно добивался истины — больше, чем кто-либо иной. Но... он без особой нужды отправляется в Рим, чтобы драться с попами и прочими политиканами... Не могу себе представить, чтобы я, например, предпринял бы нечто подобное, чтобы отстаивать теорию относительности. Я бы подумал: истина куда сильнее меня, и мне бы показалось смешным донкихотством защищать ее мечом, оседлав Росинанта...»

Теория относительности произвела революцию в физике, и в этом она была созвучна тем общественным идеям, которые реяли над потрясенной революциями планетой. Она как бы призывала отбросить не только обветшалые научные догмы, но и обветшалые методы государственного руководства. Это понимали все, в том числе и противники революционных методов. И по мере того, как росла и ширилась слава Эйнштейна, разгоралась и борьба вокруг его имени, вокруг теории относительности.

Революционер в науке, он от всего сердца приветствовал Октябрьскую революцию. «Я был и продолжаю оставаться другом России», — повторял он не раз. Он много общался с русскими и понимал роль Ленина. «Я уважаю в Ленине человека, который с полным самоотвержением отдал все свои силы осуществлению социальной справедливости. ...Люди, подобные ему, хранят и обновляют совесть человечества».

Эйнштейн был на редкость добрым, миролюбивым и отзывчивым человеком. Он был добр не потому, что все прощал, а потому, что все понимал. Казалось бы, за что его ненавидеть? А между тем у него было немало лютых врагов. На теорию относительности и ее творца изрыгали хулу и клевету. Некто Вейланд создал специальный комитет по борьбе с влиянием Эйнштейна. Особенно бесновался физик-экспериментатор Ленард — профессор Гейдельбергского университета, отъявленный шовинист, а вскоре — верный слуга бесноватого фюрера. Яростно ненавидя великого ученого, он не только обливал помоями теорию относительности, но и открыто призывал к физической расправе над Эйнштейном. Раздавались голоса: «Теория относительности — не немецкая теория!», что это — «большевистская физика», «низкая научная сплетня». Одна из газет писала: «Незачем обвинять рабочих за то, что они следуют за Марксом, если германские профессора следуют за измышлениями Эйнштейна». Это уже фашизм подымал голову...

Хоть Эйнштейн и любил повторять, что одиночество, по восточной пословице, подобает только всевышнему, однако сам он всегда стремился к уединению. Идеальное место для работы ученого, утверждал он, — это место служителя маяка. Он любил свой тихий угол, свои бумаги, обсыпанные трубочным пеплом, а домашние туфли и фуфайку предпочитал всей прочей одежде. Мысль — вот главное, что скрашивало жизнь ученого. Однако он не стал «мыслительной машиной». Оставаться равнодушным и безучастным — это было не в характере Альберта Эйнштейна. Бремя великой славы, легшей на его плечи, всегда напоминало ему о той ответственности, которую несет в наше время ученый за судьбу человечества.

«Мне приходилось делить свое время между политической и нравственными», — скажет он позже. Ему было тяжело отрываться от работы, но он не жалел времени. Его активность все возрастала. Голландия, Чехословакия, Австрия, Америка, Англия, Франция, наконец — Индия, Китай, Япония, а на обратном пути — Палестина и Испания. — вот те страны, где он побывал в 20-е годы. (В Аризоне он посетил индейское племя. Индейцы присвоили ему имя «Вождь Великой Относительности» и подарили индейский костюм.) Он читал лекции многотысячным аудиториям — «отстаивал новую картину мира перед коллективным разумом человечества». Враждебно настроенные элементы не преминули воспользоваться и этим обстоятельством. В брошюре «Теорию относительности внушают массам», вышедшей в Германии, писалось, что, поскольку ошибочность теории

относительности стала очевидной для научных кругов, Эйнштейн все чаще начал теперь обращаться к массам, дабы снискать там популярность себе и своей теории. Ученого обвиняли в том, что он занимается «пошлой рекламной теорией относительности».

Эйнштейн спокойно продолжал начатое. Он был рядом с такими «святилами интернационального ума и творчества», как Горький, Ромен Роллан и Барбюс, Тагор и Неру, как Шоу, Анатоль Франс, Уэллс и др. Со многими из них его связывали узы дружбы. Он охотно ставил свою простую четкую подпись под воззваниями, где бичевались поджигатели войны и виновники «морального одичания» — расисты, где отстаивалась коллективная безопасность народов и принципы разоружения, мира, братства.

Да, по натуре этот бледный человек в черной одежде и с седыми развевающимися волосами не был борцом, однако его вклад в дело борьбы за мир, за победу над обскурантизмом и за укрепление международной солидарности несомненно значителен.

В Германии Эйнштейн прожил двадцать лет — до прихода к власти Гитлера. По чистой случайности в ту зиму он находился за океаном, читал лекции в Калифорнии. Это его спасло. По он был занесен в списки противников нацистского режима и фактически приговорен к смерти. Специальный альбом открывался его портретом. После перечня «преступлений» ученого, главное из которых — открытие теории относительности, было напечатано: «Еще не повешен». Дом ученого был разграблен, книги и архив сожжены, за его голову объявлено крупное вознаграждение — 50 тысяч марок.

...А в Цюрихе в это время был очень серьезно болен его младший 22-летний сын Эдуард. Тяжелый психический недуг. Врачи не обнадеживали родителей...

Осенью 1933 года Эйнштейн эмигрировал в США. Он занял предложенное ему место профессора Принстонского института высших исследований.

Французский физик Ланжевен заявил, что такое событие можно сравнить только с предполагавшимся перемещением Ватикана из Рима в Новый Свет. «Папа современной физики переселяется, благодаря этому США становятся центром естественных наук».

Это было последнее путешествие Эйнштейна...

...И вот — осень и зима его жизни... Тихая жизнь в тихом университетском городке (Принстон, штат Нью-Джерси), среди идиллических роц и лесов, в часе езды от моря. Спокойная творческая работа, не обремененная ни чтением лекций, ни конкретными научными планами. Двухэтажный деревянный коттедж с зелеными ставнями — на Мерсерстрит, 112; огромные окна кабинета смотрят в большой сад.

Но для Эйнштейна Принстон не стал спокойной гаванью...

Его единственной страстью оставалась наука. Но почему-то, чем старше он становился, тем все больше втягивался в «мирские дела». Из Принстона неслись его протесты против расизма, реакции и войны. Множество самых разных людей обращались к нему за помощью и советом. Он не мог им отказать. «Я никогда не был силен в слове „нет“», — говорил он. Да и не потому только...

А когда началась «атомная эра», к Эйнштейну пришли физики среднего и младшего поколения...

В конце 30-х годов была открыта реакция деления ядер урана. Наука начинала творить настоящие чудеса. Но она могла принести и неисчислимые беды. Гитлеру нетерпелось получить в свои руки атомную бомбу. Чинимая опасность, Эйнштейн 2 августа 1939 года направил президенту Рузвельту письмо, в котором сообщал о все возрастающем интересе нацистов к урану. Вскоре после этого в США начались интенсивные работы по созданию атомной бомбы.

Через пять с половиной лет, в надежде предотвратить атомную бомбардировку японских городов, ученый снова пишет Рузвельту. Письмо это осталось нераспечатанным на президентском столе: Рузвельт внезапно умер...

Непосредственного участия в создании атомной бомбы Эйнштейн не принимал. Но к расщеплению атомного ядра и к бомбе науку привела его формула $E = mc^2$, выведенная из теории относительности, установившая зависимость энергии от массы. Пользуясь этой формулой, физики приоткрыли таинственный «ящик Пандоры».

Всех выдавших Эйнштейна поражал особый блеск — блеск мысли, который излучали его глаза. («Ни одна фотография не могла передать блеска его глаз», — вспоминает Инфельд). Но в те дни глаза великого ученого казались потухшими. Тяжело переживая трагедию Хиросимы и Нагасаки, он говорил в своем выступлении по радио: «Если бы я знал, что немцы не создадут атомную бомбу, я бы ничего не сделал для бомбы. Но он не проклинал науку. «Открытие деления урана угрожает цивилизации и людям не более, чем изобретение спички». Судьба мира отныне будет зависеть от моральных устоев человечества, а не от уровня развития науки. «Наша защита не в оружии, — говорил Эйнштейн, — не в науке, не в том, чтобы уйти под землю. Наша защита в законности и порядке». Не на разрушение и смерть, а на созидание, на благо людям должно направить эту чудодейственную силу — атомную энергию.

Фашизм разгромлен, но ученый не доверяет тишине: сколько раз она оказывалась обманчивой!.. «Война выиграна, но мир не выигран!» Его не покидает тревога. «Сыновья тьмы могут вылезти из мышиных нор, в которых они сейчас прячутся». — «Светлые времена — мрачные времена». Так назывался сборник, в котором ученый напечатал свой автобиографический набросок. Очень емкое название: короткое тире разделяет счастье от бедствия. Один неосторожный шаг — и мир может взлететь на воздух. «Разоружайся — или погибай!» — предупреждал ученый. В этих словах — точность и сила математической формулы.

И без того люди уходят из жизни как-то чересчур интенсивно. В 1936 году, вслед за старшей своей дочерью, умерла Эльза, жена ученого. Потом умерла его сестра Майя. Но пустел не только дом на Мерсерстрит, 112. Один за другим уходили друзья и сподвижники. Покинул с собой любимый друг Эйнштейна физик-теоретик Пауль Эренфест. Умерла Мария Кюри. Потом Поль Лапикевен...

«Не обижайтесь на то, что я так мало пишу. Демон проблем безжалостно сжимает меня в своих когтях и заставляет предпринимать отчаянные усилия, чтобы преодолеть математические трудности». Эта жалоба проходит по письмам Эйнштейна последних лет жизни как некий лейтмотив.

Тридцать пять лет изо дня в день садился он за работу с этой надеждой — установить, «как тяготение и электричество связаны друг с другом».

Электромагнитное поле открыл Фарадей, Максвелл написал его уравнения. Поле тяготения начал изучать Ньютон, а завершил в общей теории относительности Эйнштейн. Но они оставались оторванными друг от друга сущностями. Единая теория поля должна была их связать!

Единая теория поля... В ней и его сизифов труд и его танталовы муки. Сколько раз Эйнштейну казалось, что он вплотную приблизился к цели. «Думаю, что я наконец ухватился за краешек истины...». Потом он отходил от нарисованной им картины, превращался в строгого судию и... все перечеркнув, начинал сначала. «Я хорошо понимаю, — говорил он с грустной иронией, — почему многие так любят колоть дрова: тут сразу видишь результат работы». Труд, который он взвалил на свои плечи, непосилен для одного человека — это он сознавал и не обольщался надеждой. Ему попросту не успеть. Однако какая-то сила, что сильнее его, заставляла продолжать начатое.

Откуда он черпал силы, чтобы годами выдерживать такое колоссальное умственное напряжение? В этом — одна из загадок его поразительного интеллекта.

Порой ему казалось, что трудности преодолены. «Единая теория поля теперь уже закончена», — сообщал он за пять лет до смерти Морису Соловину. — Несмотря на весь затраченный труд, я не могу ее проверить каким-либо способом. Такое положение сохранится на долгие годы, тем более, что физики не воспринимают логических и философских аргументов».

С годами начинаешь понимать, как, в сущности, мало у человека времени... Эйнштейн всю жизнь «избегал давки» и «всяческой суеты сует», а теперь старался уйти от тирании быта и мелочных забот. Он обходился без воротничков и подтяжек и только в холодные дни надевал носки, отстригал длинные волосы; он носил кожаную куртку и простую фуфайку — так была решена «проблема костюма». Для умыванья и для бритья он употреблял одно и то же мыло. «Два сорта мыла — это слишком сложно для меня», — объяснял он. Благопристойных бюргеров многое в нем шокировало, зато дети очень любили «старого дока», который, ласково улыбаясь встречным, легкой походкой проходил по улицам Принстона, где его знал каждый от мала до велика.

Посетивший в мае 1946 года Эйнштейна Илья Эренбург обратил внимание на то, что в доме этого человека «с глазами мудреца и ребенка» «все казалось брошенным, как будто хозяин уже ушел из привычного уютного в мир, который безграничен».

Эйнштейн, бывало, любил повторять слова Лейбница: «Музыка есть радость души, которая вычисляет, сама того не сознавая». В дни молодости он часто испытывал непреодолимую «тоску по клавишам», музыка помогала ему работать. Но все это — позади. Скрипка требует немалых сил, он отказался от нее. Он завещал ее подрастающему внуку, а пока что она поконится в футляре. Набор долгоиграющих пластинок и проигрыватель — подарок заботливых друзей — вот теперь его музыка.

Эптон Синклер прислал ему свой роман. Эйнштейн поблагодарил писателя. Но пусть автор не обижается: он, видимо, не сможет прочесть его книгу; вся его мозговая энергия направлена теперь на то, чтобы завершить единую теорию поля. Беллетристкой он никогда не увлекался. Любил Гейне, Гете и особенно Достоевского, о котором сказал однажды: «Достоевский дает мне больше, чем любой мыслитель, больше, чем Гаусс!» А теперь — несколько страничек «Дон Кихота» перед сном, вот все, что он может себе позволить. Любовь к роману Сервантеса он пронес через всю жизнь — не потому ли, что он и сам в каком-то смысле был Дон Кихотом?... Во всяком случае коллеги-физики в его донкихотстве не сомневались. И как раз в связи с единой теорией поля. Они твердили, что это бесперспективно, что из-за нее он выпал из общего «потока физики», «отстал от насущных проблем». «Физики считают меня старым глупцом», — говорил Эйнштейн, — но я убежден, что в будущем развитие физики пойдет в другом направлении, чем до сих пор». Он пытался нацунуть этот путь.

...Как-то Чарли Чаплин сказал Эйнштейну: «Вам люди аплодируют потому, что вас никто не понимает, а мне — потому, что меня понимает каждый».

Одно время утверждали, что теорию относительности во всем мире понимают три человека, включая ее творца. Через несколько лет их стало восемь, потом — двенадцать... Эйнштейн шутил: «С тех пор, как на теорию относительности навалились математики, я сам перестал ее понимать!»

Его ум подымался до таких высоких абстракций, что следить за ходом его мысли дано было далеко не каждому. За ученым упрочилась слава мыслителя, идеи которого непостижимы.

Английский поэт XVIII века, Александр Поп, сочинил такое двустишие:

Был этот мир глубокой тьмой окутан.
Да будет свет. И вот явился Ньютон.

В наше время кто-то добавил еще две строчки:

Но сатана недолго ждал реванша.

Пришел Эйнштейн, и стало все как раньше.

Казалось бы, говорить на тему «Эйнштейн — популяризатор» — по меньшей мере парадоксально.

Однако Эйнштейн, как, быть может, никто из современных ему физиков, стремился к ясности, к простоте, хотел быть понятным и понятым. Он ненавидел псевдопрофессорский туман во всех его проявлениях и оттенках. Он вовсе не кокетничал, когда писал: «Радостное и вдохновляющее чувство испытываешь, видя проблему изложенной кратко и живо во всем ее разнообразии и во всех ее связях». А еще: «Теория производит тем большее впечатление, чем проще ее предпосылки». О себе Эйнштейн говорил, что он «на протяжении долгих лет всеми силами стремился придавать ясность основам... науки и совершенствовать их».

Кант некогда категорически утверждал: «В каждой естественной науке заключено столько истины, сколько в ней есть математики». Но Эйнштейну ближе другое мнение — Гёте: «Физику нужно изучать отдельно от математики. Первая должна существовать совершенно независимо и пытаться... проникать в природу и ее священную жизнь, ни мало не беспокоясь о том, что дает и делает со своей стороны математика». Эйнштейн считал: «Ни один ученый не мыслит формулами». Шутил: «Математика — это единственный совершенный метод водить самого себя за нос». Прежде формулы должны быть мысль, формула — следствие мысли. Не случайно, например, говоря о Фарадее, он подчеркивал — как важное его преимущество, — что это «ум, который никогда не погрязал в формулах». Толковать это можно и в прямом смысле: перелистайте Фарадея — у него нет формул.

Не надо только это все принимать упрощенно: Эйнштейн понимал роль математики и неоднократно подчеркивал, что «доступ к более глубоким принципиальным проблемам в физике требует тончайших математических методов».

Не скажешь, что первая статья Эйнштейна о теории относительности («К электродинамике движущихся тел») написана популярно, однако никто после него не сумел изложить ее короче, проще и убедительнее, хотя таких попыток предпринималось множество.

К популярной литературе Эйнштейн питал привязанность с детства. Он зачитывался не романами об индейцах и пиратах, а научно-популярными книгами. Тут следует упомянуть «Силу и материю» Людвиг Бюхнера, бернштейновские естественнонаучные книги для народа и даже пятитомный «Космос» Гумбольдта. «Чтение научно-популярных книжек привело меня вскоре к убеждению, что в библейских рассказах многое не может быть верным, — вспоминал ученый. — Этот скептицизм никогда меня уже не оставлял». Здесь, безусловно, и начало эйнштейновского свободомыслия и его иронического отношения к авторитету государства.

Сам Эйнштейн — считая формально — лишь дважды обращался непосредственно к научно-популярному жанру. В 1917 году он выпустил книгу «О специальной и общей теории относительности» (с подзаголовком: «Общедоступное изложение»). Об этой своей работе, как о книге популярной, Эйнштейн был невысокого мнения и называл ее «общедоступным изложением». «Мой коллега Планк, — говорил ученый, — часто подсмеивается: Эйнштейн думает, будто его книги станут понятнее, если он время от времени станет пересыщать их словами „дорогой читатель!“».

Через двадцать лет была написана, в соавторстве с Леопольдом Инфельдом, «Эволюция физики». Кроме того, Эйнштейн писал научно-популярные статьи, выступал как популяризатор с трибуны.

Популяризации знаний ученый придавал огромное значение. «То обстоятельство, что научные знания являются достоянием лишь маленькой группы людей, снижает философский уровень народа, — отмечал он, — приводит к духовному оскудению».

А какой, по Эйнштейну, должна быть научно-популярная книга?

«Книга должна быть интересной, захватывающей для каждого, кто любит науку».

«Следует исходить не из того, что у читателя есть какие-то знания, а скорее ориентироваться на его высокое умственное развитие».

Изложение должно строиться не как цепь лишь внешне связанных (а местами и подтасованных «для убедительности») фактов — его должна пронизывать «новая точка зрения, идеи, расположенные в правильной перспективе», ибо история развития науки — «это драма, драма идей».

Он отвергал популяризацию, «спекулирующую на чувствах читателя», и чисто внешние эффекты — жонглирование остроумием, метафоричность, зыбкие сравнения и аналогии. Допустимы лишь те приемы, которые бьют точно в цель. Он не изменил потом свою точку зрения. «Хорошая популяризация, — говорил он, — может и должна возбуждать чувства не экскурсами в область метафизики, а вызываемым ею усилением постижения — мучительным и в то же время радостным усилением все более и более полного и глубокого постижения».

Эйнштейн дал прекрасные образцы такой популяризации.

Вот, например, одно из его пояснений принципа относительности, сделанное в 1911 году. «Представим себе двух физиков, у обоих есть лаборатория, снабженная всеми мыслимыми физическими аппаратами. Лаборатория одного из физиков находится в открытом поле, а лаборатория другого — в вагоне поезда, быстро несущегося в определенном направлении. Принцип относительности утверждает: два физика, применив все аппараты для изучения всех существующих в природе законов — один в неподвижной лаборатории, другой в вагоне, — найдут, что эти законы одни и те же, если вагон движется равномерно и без тряски. Если сказать в более абстрактной форме, то это выглядит так: согласно принципу относительности, законы природы не зависят от переносного движения систем отсчета».

Или в другом месте:

«Мы выбираем в качестве системы отсчета курьерский поезд длиной 10 километров. В начале поезда сидит пассажир А, а в конце — пассажир Z; между ними, следовательно, неизменное расстояние в 10 километров. Вагоны прозрачны, так что пассажиры могут обмениваться сигналами. Кроме того, оба пассажира вооружены часами, идеально одинакового хода...»

А если далее не всем становилось понятно, что же, собственно, происходит с часами, щедрой рукой ученого развешенными в разных точках пространства, — то его ли в этом вина?.. Он сделал все возможное, чтобы объяснить, и примеры, им данные, — это примеры навсегда. Он знал цену научно-популярного образа и был его мастером.

«Атом, — пишет он, — это скупой богач, который при жизни вовсе не тратит денег (энергии). Но в завещании он оставляет свое состояние двум сыновьям M' и M'' с условием, что они отдадут обществу небольшую часть — меньше одной тысячной — состояния (энергии или массы). Состояние, получаемое сыновьями, таким образом, несколько меньше, чем состояние, которым владел отец (сумма масс $M' + M''$ несколько меньше, чем масса M делящегося атома). Но часть, отдаваемая обществу, относительно небольшая, все же настолько громадна (рассматриваемая как кинетическая энергия), что она несет с собой для общества угрозу несчастья. Отвратить эту угрозу — стало самой настоятельной проблемой нашего времени».

«Эйнштейн писал прекрасно, сжато, в его стиле ощущается дыхание поэзии», — говорит Инфельд. Правда, ученому не всегда удавалось рассуждать так, как рассуждает обыкновенный человек — слишком велика была разница, но он всегда стремился к тому, чтобы его понимали. Даже от самых сложных его статей исходит подкупающий аромат простоты, а порой и некоторой — вовсе не нарочитой — простоватости. Он не подавляет эрудицией, не поучает, а доверительно и запросто беседует с чита-

телем, как любил беседовать в жизни. И эта деловая беседа иногда сдвигается живым сравнением, серьезный разговор словно бы пронизывает улыбка. Юмор, шутка, острота — они тоже идут в дело. На эту особенность эйнштейновской беседы обратил внимание еще Ромен Роллан, когда молодой ученый в сентябре 1915 года посетил его виллу «Мозер» в Веве. Маститый писатель занес в дневник: «Он жизнерадостен и не может удержаться от того, чтобы не придать остроумную форму самым серьезным мыслям».

«Я не считаю законным скрывать логическую независимость понятия от чувственного восприятия», — пишет Эйнштейн в статье «Физика и реальность». — Отношение между ними аналогично не отношению бульона к говядине, а скорее гардеробного номера к пальто». И, говоря, далее, о возможностях чисто алгебраического метода описания природы, он замечает скептически: «Но в настоящее время такая программа смахивает на попытку дышать в безвоздушном пространстве».

Касаясь вопросов броуновского движения, Эйнштейн приходит к такому удивительно-прозрачному заключению: «В какой-то мере можно говорить, что под микроскопом часть тепловой энергии непосредственно видна в форме механической энергии движущихся частиц» («Теоретическая атомистика»).

«Из теории квантов нельзя сделать никаких выводов против непрерывности процессов», — говорил ученый писателю Александру Мошковскому. — Представьте себе, что пиво продавалось бы только целыми литрами. Неужели вы отсюда заключили бы, что пиво само по себе прерывно?».

Враг суконной фразы и казенных мыслей, он умел говорить емко и образно. «Дифференциальное уравнение в частных производных вошло в теоретическую физику в качестве служанки, но постепенно стало госпожой» («Влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности»).

Таких вот образцов популярного стиля у Эйнштейна много. Их из его статей, писем, выступлений и записанных бесед с ним можно черпать буквально пригоршнями.

«Всю жизнь я любил хорошо обдуманные, трезвые фразы и лаконичный стиль», — писал Эйнштейн.

Он умел — в немногих словах — нарисовать глубоко психологический портрет ученого.

В заметке «Памяти Пауля Эренфеста» читаем: «Его величие заключалось в чрезвычайно хорошо развитой способности улавливать самое существо теоретического понятия и настолько освобождать теорию от ее математического наряда, чтобы лежащая в ее основе простая идея проявлялась со всей ясностью. Эта способность позволяла ему быть бесподобным учителем. По этой же причине его приглашали на научные конгрессы, ибо в обсуждениях он всегда вносил изящество и четкость. Он боролся против распыленности и многословия; при этом пользовался своей пронизательностью и бывал откровенно неучтив. Некоторые его выражения могли быть истолкованы как высокомерные, но его трагедия состояла именно в почти болезненном неверии в себя. Он постоянно страдал от того, что у него способности критические опережали способности конструктивные. Критическое чувство обкрадывало, если так можно выразиться, любовь к творению собственного ума даже раньше, чем оно зарождалось».

Память Марии Кюри, с которой он был связан двадцатилетней дружбой, он почитал словами: «Мое восхищение ее человеческим величием постоянно росло. Ее сила, чистота желаний, требовательность к себе, объективность, неподкупность суждений — все эти качества редко совмещаются в одном человеке. Она в любой момент чувствовала, что служит обществу, и ее большая скромность не оставляла места для самолюбования. Ее постоянно угнетало чувство жестокости и несправедливости общества. Именно это придавало ей вид внешней строгости, так легко неправильно

понимаемой теми, кто не был к ней близок, — странной строгости, не смягченной каким-либо искусственным усилием».

О Ньюtone Эйнштейн сказал: «Природа для него была открытой книгой, которую он читал без усилий... В одном лице он сочетал экспериментатора, теоретика, мастера и, не меньше, художника в изложении. Он предстал перед нами сильным, уверенным и одиноким; его радость созидания и ювелирная точность проявлялись в каждом слове и в каждом рисунке».

А вот несколько «научно-популярных шуток», которые Эйнштейн так любил.

Однажды 9-летний сын ученого, Эдуард, спросил: «Папа, почему, собственно, ты так знаменит?» Ученый рассмеялся, потом сказал: «Видишь ли, когда слепой жук ползет по поверхности шара, он не замечает, что пройденный им путь изогнут. Мне же посчастливилось заметить это».

В статье, которую поместил в ноябре 19-го года «Таймс», Эйнштейн писал: «Вот пример относительности для развлечения читателей. Сейчас в Германии меня называют немецким ученым, а в Англии я представлен как швейцарский еврей. Случись мне стать *bête noire*, произошло бы обратное: я бы оказался швейцарским евреем для Германии и немецким ученым для Англии».

При случае он не прочь был щелкнуть по носу какого-нибудь высокоученого сноба. Беседуя как-то с группой физиков, Эйнштейн на вопрос, почему электроны имеют одинаковый заряд, ответил: «Ну, а почему все шарики козлинного помета имеют одинаковую величину?»

«Серьезный человек радуется, когда ему удастся хоть раз посмеяться от чистого сердца», — говорил Эйнштейн. Если его величали «гениальным», «мудрым», это его всегда смешило. Он отшучивался: «Еще и впредь кто-нибудь в это поверит!»

Таким он был — этот удивительный человек, мудрый и простой, жизненнолюбивый и пронизательный, великий ученый, друг угнетенных, проповедник братства и мира на земле, враг обскурантизма и насилия.

«Моральные качества выдающейся личности», — писал он, — имеют, возможно, большее значение для данного поколения и всего хода истории, чем чисто интеллектуальные достижения».

Его труды перевернули физику, но огромно значение и его необыкновенной личности.

Говоря о великих фигурах мира, Бернард Шоу как-то заметил: «Наполеон и другие ему подобные великие люди были создателями империй, но есть люди, которые стали создателями миров; их руки никогда не были обгажены кровью... Я возвращаюсь мысленно на две с половиной тысячи лет назад — и сколько же я могу насчитать таких людей? Я могу их сосчитать на пальцах моих двух рук: Пифагор, Птолемей, Кеплер, Аристотель, Галилей, Ньютон, Эйнштейн».

О нем много написано и будет написано еще больше. И по мере того, как мы глубже познаем Эйнштейна-человека, растет его обаяние. Он был на редкость цельным и чистым и как никто из его современников жил всецело наукой, исключительно для науки. Наука для него была «очищающим будничным делом». Во имя познания мира он призвал отречься от всего мелко-личного, повседневного. «Радость видеть и понимать есть самый прекрасный дар природы», — говорил он. Подвиг его жизни велик, прекрасен и поучителен. Он сказал о Лоренце: «Жизнь его — драгоценное произведение искусства». К самому Эйнштейну эти слова приложимы с еще большим, быть может, основанием.

В марте 1955 года цивилизованный мир широко отмечал 76-летие великого ученого и полувековой юбилей теории относительности. В приветственной телеграмме, отправленной в Берлин, ученый писал: «Я радуюсь, что дал повод к братскому сотрудничеству, а не к разногласиям и вражде».

«Свою задачу на земле я выполнил», — без горечи и без сожаления сказал Эйнштейн за несколько дней до смерти.

Лет за двадцать до этого он говорил Инфельду: «Жизнь — это возбуждающее и великолепное зрелище. Она мне нравится. Но если бы я узнал, что через три часа должен умереть, это не произвело бы на меня большого впечатления. Я подумал бы о том, как лучше всего использовать оставшиеся три часа. Потом бы я сложил свои бумаги и спокойно лег, чтобы умереть».

Смерть — даже в молодости — его не страшила. «Я чувствую себя настолько солидарным со всем живущим, что для меня безразлично, где начинается и где кончается отдельное». Эти слова были произнесены 37-летним Эйнштейном во время тяжелой болезни.

В 1948 году врачи предупредили ученого, что у него сильное расширение аорты, прободение ее стенки может произойти в любую минуту. От операции он отказался, но, подумав об оставшихся «трех часах», решил подвести итоги. Так появилась его «Творческая автобиография», а затем и автобиографический набросок...

Умер он легко, счастливо: заснул и не проснулся. Это случилось 18 апреля 1955 года, в ночь на понедельник.

Он не хотел ни могилы, ни памятника, ни публичной траурной церемонии. За его гробом — в крематорий — шло двенадцать человек. Его прах был развеян по ветру, а мозг (на то имелось «скептическое разрешение» ученого) сохранен. Он оказался обыкновенным с виду, средних размеров.

У одного принстонского старика спросили, почему он, ничего не зная о содержании трудов ученого, так глубоко его почитает. Старик ответил: «Когда я думаю о профессоре Эйнштейне, у меня появляется такое чувство, будто я уже не одинок».

«Эйнштейн был совестью человечества в такое время, когда многие достижения цивилизации теряли свою цену», — писал знаменитый испанский музыкант Пабло Касальс. — Кажется, что со смертью Эйнштейна мир утратил часть самого себя». — «Я не знал более великого человека», — заявил Бертрам Рассел. — «Луч света в этом мире, где тени все больше сгущаются», — писал в своем соболезновании Джавахарлал Неру.

«Эйнштейн не замыкался в узкие рамки научной работы и горячо откликался на вопросы, волнующие передовое человечество. Эйнштейн был противником войны и использования атомного оружия. Советские ученые чтут память выдающегося ученого Альберта Эйнштейна», — говорилось в статье, подписанной группой советских академиков.

Открытый вскоре после смерти ученого 99-й элемент периодической системы был назван «эйнштейнием».

...Дом с островерхой крышей в Ульме, в котором Эйнштейн родился, был разбомблен во время войны. Его архивы погибли от руки нацистов, книги его сжигали на костре. Гитлер хотел уничтожить его физически, а некоторые другие пытались «закрыть» и Эйнштейна, и теорию относительности. Но — не получилось. Не могло получиться, потому что нельзя остановить мысль.

Слава Эйнштейна широко и ясно разгорается над миром. Некогда «самый абстрактный», «самый непонятный», он для нас все яснее и ближе. Все больше теперь дорог, ведущих к его учению. И все теснее оно смыкается не только с высокой теорией, но и с самой насыщенной практикой.

Е. М. Кляус

КОММЕНТАРИИ¹

I

Принципы теоретической физики

Принципы теоретической физики. Вступительная речь перед Прусской Академией наук в 1914 г. (Antrittsrede...) Напечатано в «Preussische Academie der Wissenschaften. Sitzungsberichte», Bd. II, 1914, S. 739—742; то же в кн. «Mein Weltbild». Amsterdam, 1934.

Принципы научного исследования. Речь на праздновании шестидесятилетия со дня рождения Макса Планка в 1918 г. (Motiv des Forschens). Напечатано в сб.: «Zu Max Plancks 60 Geburtstag (Ansprachen in der Deutschen physikalischen Gesellschaft)». Karlsruhe, 1918, S. 29—32; см. также «Mein Weltbild».

Макс Планк (1858—1947) — немецкий физик. Исследования Планка относятся к термодинамике теплового излучения. Ввел представление о квантовом обмене энергией между линейными осцилляторами и полем излучения. Работы по общей термодинамике и термодинамике слабых растворов; работы по теории относительности. Лит.: M. Planck, Physikalische Abhandlungen und Vorträge, Bd. 1—3. Braunschweig, 1958. — М. Планк. Введение в теоретическую физику, т. 1—5, Изд. 2. М. — Л., 1932—1935. — Физические очерки. Пер. с нем. Л. Я. Штрума. М., 1924. — Сб. «Макс Планк (К столетию со дня рождения)». Изд-во АН СССР, 1958.

Предисловие к немецкому изданию книги Лукреция «О природе вещей».

Тит Лукреций Кар (род. около 99 — ум. 55 до н. э.) — древнеримский философ и поэт. Лит.: Лукреций. О природе вещей. (Редакция латинского текста и перевод Ф. А. Петровского), т. 1—2. М., 1946—1947.

Эпикур (341—270 до н. э.) — древнегреческий философ-материалист. Лит.: Epicurus. The extant remains of the Greek text. Transl. by Cyril Bailey. N. Y., 1947. — «Материалисты древней Греции (Собрание текстов Гераклита, Демокрита и Эпикура)». М., 1955. К. Маркс. Различие между натурфилософией Демокрита и натурфилософией Эпикура. (В. кн.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Из ранних произведений. М., 1956).

Демокрит из Абдеры (ок. 460—370 до н. э.) — древнегреческий философ-материалист. Лит.: «Демокрит в его фрагментах и свидетельствах древности». М., 1935. — «Античная философия». М., 1940. — А. О. Маковельский. Древнегреческие атомисты. Баку, 1946.

Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики (Newton's Mechanik und ihr Einfluß auf die Gestaltung der theoretischen Physik). Напечатано в «Naturwissenschaften». Bd. 15, 1927, стр. 273—276; то же в кн. «Mein Weltbild».

¹ Составил У. И. Франкфурт.

Исаак Ньютон (1643—1727) — английский физик, механик, математик и астроном. Открыл закон всемирного тяготения, сформулировал основные законы классической механики; наряду с Лейбницем разработал дифференциальное и интегральное исчисление; открыл законы разложения белого света на монохроматические лучи; дал теорию движения небесных тел, образующих солнечную систему. Лит.: I. Newton. Opera quae exstant omnia, v. 1—5. Londini. 1779—1785.— The correspondence of Isaac Newton. Ed. by H. W. Turnbull. I. Newton's papers and letters..., 3 t., Harvard Univ. Press., 1959—1964.— Н. Ньютон. Математические начала натуральной философии. (В кн.: А. Н. Крылов. Собрание трудов, т. 7. М.—Л., 1936).— Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. Пер. с англ. С. И. Вавилова. М.—Л., 1927.— Лекции по оптике. Пер. С. И. Вавилова. М.—Л., 1946.— Всеобщая арифметика или книга об арифметическом синтезе и анализе. Пер. А. П. Юшкевича. М.—Л., 1948.— Математические работы. Пер. Д. Д. Мордухай-Болтовского. М.—Л., 1937.

Теоретическая атомистика (Theoretische Atomistik). Напечатано в серии «Kultur der Gegenwart», Т. I., «Die Physik», Под редакцией Е. Лехера, 1915, стр. 251—263; изд. 2. 1925, стр. 281—294.

Предисловие к «Оптике» Ньютона (Foreword. S. VII—VIII von Sir Isaac Newton: «Optics...» Reprinted from the 4-th ed., London, N. Y. 1730). Напечатано в книге И. Ньютона «Оптика». 1931. Лит.: С. И. Вавилов. Исаак Ньютон. Изд. 2. М.—Л., 1945. «Исаак Ньютон (Сборник статей к трехсотлетию со дня рождения)», М.—Л., 1943.— D. Brewster. Memoirs of the life, writings and discoveries of sir Isaac Newton, v. 1—2. Ed. 2. Edinburgh, 1860.— F. Rosenberger. Isaac Newton und seine physikalischen Prinzipien. Leipzig, 1895.— G. L. Grav. A bibliography of the works of sir Isaac Newton... Ed. 2. Cambridge, 1907.

Относительность, термодинамика и космология (Review of R. Tolman: Relativity, thermodynamics and cosmology). Рецензия на книгу Р. Толмана. Напечатано в «Science», v. 80, 1934, p. 358.

Предисловие к книге Инфельда: «Мир в свете современной науки». Напечатано в кн.: L. Infeld. The world in modern science, 1934, p. 5—6.

Леопольд Инфельд (род. 1898) — польский физик. В 1938 г. Л. Инфельдом совместно с А. Эйнштейном и Б. Гофманом из уравнений общей теории относительности были выведены уравнения движения. В 1934—1935 гг. совместно с М. Борном провел исследования по нелинейной электродинамике. Лит.: S. Loria. Leopold Infeld. «Nauka polska», Warszawa, 1956, № 2—3.

Физика и реальность. (Physik und realität). Напечатано в «Franklin Institut Journal», v. 221, 1936, p. 313—347. Немецкий текст воспроизведен в «Zs. für freie deutsche Forschung», Т. I, 1938, № 1, p. 5—19; № 2, p. 1—14. Paris. В настоящем издании опущен первый параграф.

Джон Стюарт Милль (1806—1873) — английский философ-позитивист, логик и экономист. Сын Джеймса Милля — английского философа юмистского направления.

Нильс Бор (1885—1962) — датский физик. Один из создателей современной квантовой физики. Лит.: «Niels Bohr and the development of physics. Essays dedicated to Niels Bohr on the occasion of his seventieth birthday». London, 1955.— Б. Г. Кузнецов. Эйнштейн и Бор. (В сб.: «Развитие современной физики». М., Изд-во «Наука», 1964).

Эрвин Шредингер (1887—1961) — австрийский физик, один из создателей квантовой механики. Лит.: W. Glaser. Erwin Schrödinger. 70 Jahre. «Physikalische Blätter», Bd. 43, 1957, № 8.

Чарльз Вильсон (1869—1959) — английский физик. В 1912 г. изобрел так называемую «камеру Вильсона», с помощью которой наблюдают следы летящих частиц.

Ганс Гейгер (1882—1945) — немецкий физик. В 1908 г. изобрел совместно с Резерфордом прибор, позволяющий считать отдельные заряженные частицы. Исследовал многократное рассеяние α -частиц в тонких металлических пластинках.

О методе теоретической физики (On the method of theoretical physics...). Лекция в память Герберта Спенсера. Прочитана в Оксфорде 10 июня 1936 г. Издана в Оксфорде в 1933 г.; то же в «Philosophy of science», v. 1, 1934, p. 162—169; то же в кн. «Mein Weltbild».

Герберт Спенсер (1820—1903) — английский психолог и социолог, видный представитель позитивизма. Взгляды Спенсера подверглись критике В. И. Ленина. Лит.: H. Spenser. Works, v. 1—18. London—N. Y., 1910.

Поль Анриен Морис Дирак (род. 1902) — английский физик. Один из основателей квантовой механики. Дал метод вторичного квантования; разработал основы квантовой теории излучения; сформулировал одновременно с Э. Ферми законы статистической механики для системы электронов; построил релятивистскую теорию движения электрона. Автор книги «Основы квантовой механики». М.—Л., 1937.

Макс Борн (род. 1882) — немецкий физик. Основные работы посвящены динамике кристаллической решетки, теории строения атома, квантовой механики и теории относительности. Лит.: М. Борн. Физика в жизни моего поколения. М., ИЛ, 1963.— Эйнштейновская теория относительности. М., изд-во «Мир», 1964.

Основы теоретической физики (Foundations of theoretical physics). Напечатано в кн.: A. Einstein. Out of my later years. London, 1950, p. 98—110.

Дж. Дж. Томсон (1856—1940) — английский физик. Исследовал отношение электрического заряда к массе для частиц-носителей катодных лучей; объяснил возникновение сплошного спектра рентгеновского излучения торможением быстрых электронов при ударе о твердые тела; разработал методы для изучения изотопов; провел важные исследования по электронной теории металлов и электрическим разрядам в газах. Лит.: J. J. Thomson (совместно с G. P. Thomson). Conduction of electricity through gases, v. 1—2. Ed. 3. 1928—1933.— Дж. Дж. Томсон. Электрон в химии. М.—Л., 1927.— Электричество и материя. М.—Л., 1928.— G. Thomson. Centenary of J. J. Thomson. «Science», v. 124, 1956, № 3233.

Предварительные замечания о фундаментальных понятиях. Напечатано в кн.: «Louis de Broglie. Physicien et penseur». Paris, 1953, p. 4—15.

Луи де Бройль (род. 1892) — французский физик. Выдвинул идею о волновых свойствах материи (волны де Бройля), получивших подтверждение в опытах по дифракции электронов, атомов и других частиц. Занимался теорией распространения радиоволн в волноводах, теорией электронов, вопросами строения ядра и т. д. Лит.: L. Broglie. De la mécanique ondulatoire à la théorie du noyau, t. 1—2. Paris, 1943—1945.— Physicien et penseur. Paris, 1953.— Л. де Бройль. Введение в волновую механику. Харьков—Киев, 1934.— Магнитный электрон. Харьков, 1936.— По тропам науки. М., ИЛ, 1962.— Революция в физике. М., Госатомиздат, 1963; Изд. 2. 1965.— Электромагнитные волны в волноводах и полых резонаторах. М., 1948.

II

Предшественники и современники

Макс Планк как исследователь. (Max Planck als Forscher). Напечатано в «Naturwissenschaften», Bd. 1, 1913, S. 1077—1079.

Л. Больцман (1844—1906) — австрийский физик. Классические исследования по кинетической теории газов и статистической трактовке вто-

рого начала термодинамики. Работы по теории излучения (закон Стефана-Больцмана). Экспериментальные исследования по определению диэлектрических постоянных газов и кристаллических твердых тел. Лит.: L. Boltzmann. Wissenschaftliche Abhandlungen, Bd. 1—3. Leipzig, 1909.—Populäre Schriften, Aufl. 2. Leipzig, 1919.—Л. Больцман. Лекции по теории газов. М., 1956.—Очерки методологии физики. (Сборник статей). М., 1929.—E. Broda. Ludwig Boltzmann. Mensch, Physiker, Philosoph. Wien, 1955.

Вильгельм Вин (1864—1928) — немецкий физик. Теоретически обосновал один из законов черного излучения (закон смещения Вина); исследовал отклонение каналов лучей в электрическом и магнитном полях. Лит.: E. Rüchardt. Zur Erinnerung an W. Wien bei der 25. Wiederkehr Seines Todestages. «Naturwissenschaften», Bd. 42, 1955, № 3.

Мариан Смолуховский (Marian Smoluchowski). Напечатано в «Naturwissenschaften», Bd. 5, 1917, S. 737—738.

Мариан Смолуховский (1872—1917) — польский физик. Ему принадлежат классические труды по теории флюктуации, теории броуновского движения, исследования в области критической опалесценции. Лит.: A. Teske. Marian Smoluchowski, życie i twórczość. Kraków, 1958. (В книге имеется библиография работ Смолуховского).—В. Краевский. Борьба Мариана Смолуховского за научную атомистику. «Вопросы философии», 1956, № 4.

Эмиль Варбург как исследователь (Emil Warburg als Forscher). Напечатано в «Naturwissenschaften», Bd. 10, 1922, S. 823—828.

Эмиль Габриель Варбург (1846—1931) — немецкий физик. Лит.: Э. Варбург. Курс опытной физики. Пер. с 24-го нем. изд. М., 1936.

Август Кундт (1839—1894) — немецкий физик. Исследовал явления внутреннего трения и теплопроводности газов. Открыл метод измерения скорости звука в твердых телах и газах. Эмпирически установил общие законы аномальной дисперсии света.

К столетию со дня рождения Лорда Кельвина (Zum hundertjährigen Gedenktage von Lord Kelvins Geburt). Напечатано в «Naturwissenschaften», Bd. 12, 1924, S. 601—602.

Вильям Томсон (1824—1907) — английский физик. Работы в области термодинамики; установил термодинамическую шкалу температур; открыл явление переноса тепла электрическим током. Установил, что при адиабатическом расширении газ охлаждается (эффект Джоуля — Томсона). Разработал основы теории электрических колебаний и ряд задач математической физики. Сделал ряд важных изобретений. Лит.: W. Thomson. Mathematical and physical papers, v. 1—6. Cambridge, 1882—1911.—В. Томсон. Строение материи. СПб., 1895.

Исаак Ньютон (Isaac Newton). Напечатано в 1927 г. в «Manchester Guardian Weekly», v. 16, p. 234—234; то же в газете «Manchester Guardian», 19 March 1927.

Оценка работ Симона Ньюкома (Appreciation of Simon Newcomb). Напечатано в «Science» (новая серия), v. 69, 1929, p. 249.

Симон Ньюком (1835—1909) — американский астроном. Исследования Ньюкома посвящены изучению движения больших планет, определению астрономических постоянных, составлению каталогов точных положений звезд, обоснованию теории движения Луны и другим вопросам астрономии. Письмо Эйнштейна к дочери астронома Ньюкома было опубликовано с согласия Эйнштейна секретарем американского общества истории науки Б. Ф. Брошем.

Иоганн Кеплер (Albert Einstein über Kepler). Напечатано в газете «Frankfurter Zeitung» 9 Nov. 1930 J., S. 16. Перепечатано в кн. Эйнштейна «Mein Weltbild» под названием «Johannes Kepler».

Иоганн Кеплер (1571—1630) — немецкий астроном. Лит.: J. Kepler. Gesammelte Werke..., Bd. 1—7, 13—17. München, 1937—1955.—«Bibliografia Kepleriana». München, 1936.

Об Эдисоне (Thomas Alva Edison). Напечатано в «Science» (новая серия), v. 74, 1931, p. 404—405.

Томас Альва Эдисон (1847—1931) — американский изобретатель. Лит.: F. L. Dyer, T. C. Martin, W. H. Meadcroft. Edison, his life and inventions. N. Y.—London, 1929.—Дж. Брайан. Эдисон. Жизнь и работа. Пер. с англ., Л., 1927.—М. Я. Лапиров-Скобло. Эдисон. М., 1935.—Л. Д. Белькинд. Томас Альва Эдисон. М., Изд-во «Наука», 1964.

К семидесятилетию д-ра Берлинера (Zu Dr. Berliners siebzigsten Geburtstag). Напечатано в «Naturwissenschaften», Bd. 20, 1932, S. 913; то же в кн. «Mein Weltbild», S. 29—32.

Арнольд Берлинер (1862—1942) — издатель журнала «Naturwissenschaften». Лит.: «Naturwissenschaften», Bd. 20, 1932, S. 913—984.—M. Laue. «Naturwissenschaften». Bd. 33, 1946, S. 257.—P. P. Ewald, M. Born. «Nature», Bd. 150, 1942, p. 284, 315.

Памяти Пауля Эренфеста (Paul Ehrenfest in Memorial). Напечатано в кн.: A. Einstein. «Out of my later years», p. 236—239.

Пауль Эренфест (1880—1933) — голландский физик-теоретик. Работы Эренфеста относятся к исследованию метода адиабатических инвариантов в квантовой теории, обоснованию статистических методов в термодинамике, теории фазовых переходов второго рода и др. Лит.: Г. Е. Юленбек. Воспоминания о профессоре П. Эренфесте. УФН, т. 62, вып. 3, 1957, стр. 367—370.

Памяти Марии Кюри (Tribute to Marie Curie). Напечатано в «New York Times» 15 Apr. 1934.

Мария Склодовская-Кюри (1867—1934) — физик и химик. Ей принадлежат фундаментальные исследования по радиоактивности. Лит.: M. Skłodowska-Curie. Traite de radioactivité, t. 1—2. Paris, 1910.—L'isotope et les elements isotopes. Paris, 1924.—М. Склодовская-Кюри. Радиоактивность. М.—Л., 1947.

Памяти Вальтера Нернста (The work and personality of Walter Nernst). Напечатано в «Scientific monthly», v. 54, 1942, p. 195—196.

Вальтер Герман Нернст (1864—1941) — немецкий физик и физико-химик. В 1906 г. установил тепловой закон, часто называемый третьим началом термодинамики. Нернсту принадлежит теория электролитического растворения металлов, учение об электродных потенциалах, теория диффузионных потенциалов, диффузионная теория кинетики гетерогенных химических реакций, идущих на границе фаз. Лит.: J. R. Partington. H. W. Nernst. «J. of the Chemical Society», 1953, Sept., p. 2853—2872.

Сванте Август Аррениус (1859—1927) — шведский физико-химик. В 1887 г. создал теорию электролитической диссоциации. Ему принадлежат исследования по приложению физико-химических законов к биологическим процессам. Лит.: E. H. Riesenfeld. Svante Arrhenius. Leipzig, 1931.

Вильгельм Фридрих Оствальд (1853—1932) — немецкий физико-химик и философ-идеалист. Философские взгляды Оствальда подверглись глубокой критике В. И. Ленина. Научные исследования посвящены теории электролитической диссоциации, вопросам химической кинетики и катализа.

Якоб Гендрик Вант-Гофф (1852—1911) — нидерландский физико-химик. Исследования Вант-Гоффа посвящены стереохимии, кинетике и термодинамике химических процессов, разбавленным растворам. Лит.: М. А. Блох. Жизнь и творчество Вант-Гоффа. Пр., 1923.—E. Cohen. Jacobus Henricus van't Hoff, sein Leben und Wirken. Leipzig, 1912.

Памяти Поля Ланжевена (Paul Langevin). Напечатано в «La Pensée: revue du rationalisme moderne» (новая серия), № 12, 1947, p. 13—14.

Поль Ланжевен (1872—1946) — французский физик. Ему принадлежат исследования по теории пара и диамagnetизма, анализ отдельных вопросов теории относительности, разработка методов получения ультракоротких упругих волн с помощью пьезокварца. Лит.: P. Langevin. Oeuvres scientifiques... Paris, 1950. — П. Ланжевен. Избранные произведения. М., 1949. — О. А. Старосельская-Никитина. Поль Ланжевен. М., 1962.

Памяти Макса Планка (Max Planck in Memorial). Напечатано в кн.: A. Einstein. Out of my later years. London, 1950, p. 208—209.

Иоганн Кеплер (1499). (Johann Kepler). Напечатано в кн.: A. Einstein. «Out of my later years». London, 1950, p. 224—226.

Г. А. Лоренц как творец и человек (H. A. Lorentz als Schöpfer und als Persönlichkeit). К столетию со дня рождения Г. А. Лоренца. Напечатано в «Mein Weltbild» и в «Ideas and Opinions».

Гендрик Антон Лоренц (1853—1928) — нидерландский физик, создатель электронной теории. Им доказано, что законы электромагнетизма одинаковы во всех равномерно движущихся системах отсчета. Нашел общие преобразования пространственных координат и времени, носящих его имя. Лит.: H. A. Lorentz. Collected papers, v. 1—9. Leiden, 1934—1939. — «H. A. Lorentz». «Nature», v. 172, p. 4367, 1953. Leiden. — Б. В. Ильин. К юбилею Г. А. Лоренца. УФИ, вып. 6, 1925.

Генрих Герц (1857—1894) — немецкий физик. Впервые разработал теорию открытого вибратора, излучающего электромагнитные волны; экспериментально доказал существование электромагнитных волн и исследовал их свойства. Доказал тождественность электромагнитных волн и волн света. Построил электродинамику движущихся тел, исходя из гипотезы полного увлечения эфира движущимися телами. Ему принадлежат фундаментальные исследования в области механики. Лит.: H. Hertz. Gesammelte Werke, Bd. 1—3. Leipzig, 1895—1914. — Г. Герц. Принципы механики, изложенные в новой связи. Изд-во АН СССР, М., 1959.

К 410-й годовщине со дня смерти Коперника (Message on the 410-th anniversary of the death of Copernicus). Опубликовано в кн.: «Ideas and Opinions by Albert Einstein». N. Y., 1954, p. 359—360.

Николай Коперник (1473—1543) — польский астроном, создатель гелиоцентрической системы мира. Лит.: L. Brożek. Bibliografia kopernikowska. Poznań, 1923—1948. «Николай Коперник (Сборник статей к 400-летию со дня смерти)». М.—Л., 1947. — Н. Коперник. Сборник статей и материалов. К 410-летию со дня смерти (1543—1953). М., 1955.

Аристотель (384—322 до н. э.) — древнегреческий философ. Лит.: Oeuvres d'Aristote, t. 1—35. Paris, 1837—1892. — В. П. Зубов. Аристотель. Изд-во АН СССР, М., 1963.

III

Теория относительности

Творческая автобиография (Autobiographisches). Впервые опубликовано в сборнике «Albert Einstein, Philosopher-Scientist». Illinois, 1949. Перепечатано из сб. «Эйнштейн и современная физика». М., 1956, стр. 27—71.

Давид Юм (1711—1776) — английский философ, психолог, историк и экономист.

Адольф Гурвиц (1859—1919) — швейцарский математик. Работы по алгебре, теории чисел и математическому анализу. Лит.: D. Hilbert Adolf Hurwitz. «Math. Ann.», 1921, 83, N 3—4.

Герман Минковский (1864—1909) — немецкий математик и физик. В 1909 г. дал геометрическую интерпретацию кинематики специальной теории относительности. Лит.: H. Minkowski. Gesammelte Abhandlungen, Bd. 1—2, 1911.

Герман Гельмгольц (1821—1894) — немецкий физик и физиолог. Впервые дал математическую трактовку закона сохранения энергии, доказал применимость принципа наименьшего действия к тепловым, электромагнитным и оптическим явлениям. Ввел учение о свободной энергии. Заложил основы вихревого движения жидкости. Многочисленные исследования по физиологии нервной и мышечной деятельности. Лит.: П. П. Лазарев. Гельмгольц. Изд-во АН СССР, М., 1959.

Густав Кирхгоф (1824—1887) — немецкий физик. Ему принадлежат теоретические исследования о течении электричества по проводникам, развитие спектрального анализа, исследования по механике. Лит.: G. Kirchhoff. Vorlesungen über mathematische Physik. Bd. 1—4. Leipzig, 1874—1894. — Gesammelte Abhandlungen. Leipzig, 1882. — А. Г. Столетов. «Г. Р. Кирхгоф». (В кн.: А. Г. Столетов. Собр. соч., т. 2. М.—Л., 1941).

Эрнст Мах (1838—1916) — австрийский физик и философ-идеалист. Идеалистические взгляды Маха подверглись всесторонней критике В. И. Ленина в работе «Материализм и эмпириокритицизм».

О специальной и общей теории относительности (Общедоступное изложение). (Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, gemeinverständlich). Книга напечатана в 1917 г. в Брауншвейге.

Ипполит Физо (1819—1896) — французский физик. В 1849 г. осуществил первое измерение скорости света в земных условиях, в 1851 г. установил влияние движения материальной среды на скорость распространения света в этой среде.

Христиан Допплер (1803—1853) — австрийский физик и астроном. Лит.: Ch. Doppler. Abhandlungen. Leipzig, 1907.

Гуго Зелигер (1849—1924) — немецкий астроном, специалист по астрофизике, звездной астрономии и небесной механике. Лит.: H. Kienle. H. Seeliger. «Vierteljahrsschrift der Astron. Ges.», N 1, Leipzig, 1925.

Анри Пуанкаре (1854—1912) — французский математик. Автор более тысячи работ в области математики, механики, теоретической астрономии, физики, один из предшественников Эйнштейна. В 1905 г. опубликовал работу «О динамике электрона». В области философии примыкал к махизму. Философские взгляды Пуанкаре подверглись глубокой критике в книге В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм».

Альберт Майкельсон (1852—1931) — американский физик. Основные исследования относятся к физической оптике: определение скорости света, определение скорости относительного движения Земли и эфира, сравнение длины метра с длиной световой волны. Изобрел специальный интерферометр, звездный интерферометр для измерения угловых диаметров звезд, спектральный прибор-эшелон Майкельсона большой разрешающей силы. Лит.: А. Майкельсон. Исследования по оптике. М.—Л., 1928. — Световые волны и их применения. Изд. 2. М.—Л., 1934.

Диалог по поводу возражений против теории относительности (Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie). Напечатано в «Naturwissenschaften», Bd. 6, 1918, S. 697—702.

Что такое теория относительности. Написана по просьбе лондонской газеты «Таймс». Впервые опубликована 28 ноября 1919 г. под названием «My theory». Немецкий текст в книге «Mein Weltbild», S. 220—228 под названием «Was ist Relativitätstheorie?». Под названием «My theory» вошла в книгу Эйнштейна «Ideas and Opinions». N. Y., 1954.

Мой ответ по поводу антирелятивистского акционерного общества с ограниченной ответственностью (Mein Antwort über die antirelativitätstheo-

retische G. m. b. H. Gesellschaft mit beschränkter Haftung). Напечатано в газете «Berliner Tageblatt und Handelszeitung», 27 Aug. 1920 J.

Арнольд Зоммерфельд (1868—1951) — немецкий физик. Создал теорию тонкой структуры спектра водорода, применив релятивистскую механику. Решил (1909) задачу об излучении вертикального диполя, помещенного на границе двух сред. Лит.: E. T. Whittaker. A. J. W. Sommerfeld. «The Journal of the London Mathematical Society», 28, 1, N 109. London, 1953.

Макс Лауэ (1879—1960) — немецкий физик. Основные работы по оптике, теории относительности, квантовой теории. Лит.: M. Laue. История физики. М., 1956. — T. Hiller. Max Laue. 75 Jahre alt. «Naturwissenschaftliche Rundschau», Bd. 7, 1954, N 10.

Макс Борн (род. 1882) — немецкий физик. Теория жидкости, динамика кристаллических решеток, атомная и квантовая теории. Лит.: Л. Н. Розенцвейг и И. М. Лифшиц. Макс Борн. «Природа», 1955, № 12, стр. 37—38.

Вернер Гейзенберг (род. 1901) — немецкий физик, один из создателей квантовой механики. В 1927 г. сформулировал соотношение неопределенностей. Лит.: В. Гейзенберг. Физика атомного ядра. Л.—М., 1947. — Теория атомного ядра. М., 1953. — Философские проблемы современной атомной физики. М., 1953.

Джозеф Лармор (1857—1942) — английский физик и математик. Открыл так называемую прецессию Лармора. Лит.: D. Laarmor. Aether and matter. Cambridge, 1900.

Артур Эддингтон (1882—1944) — английский астроном. Работы по теории относительности и релятивистской космологии. Лит.: А. Эддингтон. Пространство, время и тяготение. Одесса, 1923. — Современное развитие космической физики. М.—Л., 1928. — Теория относительности. Л.—М., 1934.

Петр Дебай (род. 1884) — физик. Работы в области квантовой теории твердых тел. Лит.: M. Laue. Zu Peter Debyes 70 Geburtstag. «Zs. für Elektrochemie», Bd. 58. 1954, N 3.

Старые и новые теории поля (Field theories old and new). Напечатано в «New York Times», 3 Febr. 1929.

О современном состоянии теории поля (Über den gegenwärtigen Stand der Feldtheorie). Напечатано в кн.: «Festschrift zum 70 Geburtstag von Prof. Dr. A. Stodola». Zürich, 1929.

Аурель Стодола (1859—1942) — словацкий ученый-теплотехник. Работы Стодолы посвящены преимущественно созданию научных основ проектирования и расчета паровых и газовых турбин, теории автоматического регулирования. Лит.: Д. К. Максвелл, И. А. Вышнеградский, А. Стодола. Теория автоматического регулирования. М., 1949.

Герман Вейль (1885—1955) — немецкий математик. Известен многочисленными работами по теории непрерывных групп, дифференциальной геометрии, теории функций комплексного переменного и многих других отраслей математики. Широко известна работа: H. Weyl. Raum, Zeit, Materie. Aufl. 5. B., 1923. Лит.: A. Denjoy. Notice necrologique sur M. Hermann Weyl. C. R. P., 241, 1955, p. 1665—1667. — E. Fueter. Hermann Weyl. «Physikalische Blätter», Bd. 12, 1956, N 1.

Карл Фридрих Гаусс (1777—1855) — немецкий математик и астроном. Ему принадлежат основополагающие исследования по теории чисел, высшей алгебре, теории рядов, способа наименьших квадратов, теории поверхностей, астрономии, теоретической физики. Лит.: K. Gauss. Werke, Bd. 1—11. Göttingen, 1908. (Издание продолжается). — E. Worbs. C. F. Gauss. Ein Lebensbild. Leipzig, 1955. — «Карл Фридрих Гаусс (Сборник статей к столетию со дня смерти)». Изд-во АН СССР, М., 1956.

Георг Фридрих Бернхард Риман (1826—1866) — немецкий математик. Исследования по теории аналитических функций, теории дифференциальных уравнений, аналитической теории чисел, математического

учения о пространстве. Лит.: B. Riemann. Gesammelte mathematische Werke... Aufl. 2, N 7, 1953. — Б. Риман. Сочинения. М.—Л., 1948.

Эльвин Кристоффель (1829—1900) — немецкий математик. Работы в области теории функций, теории инвариантов алгебраических форм, теории дифференциальных уравнений. Лит.: C. F. Geiser und L. Maurer. E. V. Christoffel. «Math. Ann.», 54, 1901, p. 329—344.

Уильям Гамильтон (1805—1865) — английский математик. Применил вариационный метод в механике, построил теорию кватернионов. Лит.: R. P. Graves. Life of sire W. R. Hamilton, v. 1—3. Dublin, 1882—1889.

Шарль Кулон (1736—1806) — французский физик. Установил закон электростатических взаимодействий. Исследовал кручение и трение при скольжении и качении. Лит.: Ch. Coulomb. Memoires. Paris, 1884.

Эмиль Мейерсон (1859—1933) — французский философ-идеалист. Работы посвящены теории познания и истории науки. Лит.: E. Meyerson. Du cheminement de la pensee, t. 1—2. Paris, 1933. — Э. Мейерсон. Тождественность и действительность. СПб., 1912.

Современное состояние теории относительности (Gegenwärtiger Stand der Relativitätstheorie). Лекция, прочитанная 14 октября 1931 г.

Поле и относительность. Фрагмент из кн. «Эволюция физики». Книга написана совместно с Л. Инфельдом (см. стр. 350 наст. сборника). Напечатана в Нью-Йорке под названием: «The evolution of physics: the Growth of ideas from early concepts to relativity and quanta, mit L. Infeld». N. Y. X + 349 p.

СОДЕРЖАНИЕ

I

Принципы теоретической физики

Перевод А. М. Френка

Принципы теоретической физики	5
Принципы научного исследования	8
Предисловие к немецкому изданию книги Лукреция «О природе вещей»	11
Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики	13
Теоретическая атомистика	20
Предисловие к «Оптике» Ньютона	34
Относительность, термодинамика и космология	35
Предисловие к книге Л. Инфельда «Мир в свете современной науки»	37
Физика и реальность	33
О методе теоретической физики	61
Основы теоретической физики	67
Предварительные замечания о фундаментальных понятиях	77

II

Предшественники и современники

Перевод А. М. Френка

Макс Планк как исследователь	83
Мариан Смолуховский	88
Эмиль Варбург как исследователь	91
К столетию со дня рождения лорда Кельвина	97
Исаак Ньютон	100
Оценка работ Симона Ньюкома	104
Иоганн Кеплер (1930)	106
Об Эдисоне	110
К семидесятилетию д-ра Берлинера	111
Памяти Науля Эренфеста	113

Памяти Марии Кюри	116
Памяти Вальтера Нериста	117
Памяти Поля Ланжевена	119
Памяти Макса Планка	121
Иоганн Кеплер (1949)	122
Г. А. Лоренц как творец и человек	125
К 410-й годовщине со дня смерти Конерника	128

III

Теория относительности

Творческая автобиография. Перевод В. А. Фока и А. В. Лермонтовой	131
О специальной и общей теории относительности (Общедоступное изложение). Перевод С. И. Ларина	167
Диалог по поводу возражений против теории относительности. Перевод И. И. Чичерина	236
Что такое теория относительности. Перевод А. А. Сазыкина	247
Мой ответ по поводу антирелятивистского акционерного общества с ограниченной ответственностью. Перевод А. А. Сазыкина	252
Старые и новые теории поля. Перевод В. А. Угарова	255
О современном состоянии теории поля. Перевод А. А. Сазыкина	264
Современное состояние теории относительности. Перевод А. А. Сазыкина	272
Поле и относительность (Фрагмент из «Эволюции физики»). Перевод С. Г. Суворова	275

Приложения

Б. Г. Кузнецов. Физика и реальность у Эйнштейна	321
Е. М. Кляус. Альберт Эйнштейн	333
Комментарии (составил У. И. Франкфурт)	349

Альберт Эйнштейн

Физика и реальность

Сборник статей

Утверждено к печати

Редколлегией научно-популярной литературы

Академии наук СССР

Редактор В. А. Никифоровский

Художник А. Я. Михайлов

Технические редакторы П. С. Кашина, В. И. Зудина

Сдано в набор 22/V 1965 г. Подписано к печати 19/VIII 1965 г.

Формат 60×90^{1/16}. Печ. л. 22,5+1 вкл. Уч.-изд. л. 21,4

Тираж 60000 экз. Изд. № 189/65. Тип. зак. 2619.

Темплан НПЛ 1965 г. № 60

Цена 1 р. 65 к.

Издательство «Наука», Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

Набрано во 2-й типографии издательства «Наука»,
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

Сматрицировано и отпечатано в типографии «Красный
пролетарий» Политиздата.
Москва, Краснопролетарская, 16