АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А. Ф. ИОФФЕ

ФИЗИКА

ПРОБЛЕМЫ, ИСТОРИЯ, ЛЮДИ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Ответственный редактор
академик В. М. Тучкевич

Ленинград
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
Ленинградское отделение
1986

УДК 53.092; 538.9; 535.333; 524.85

В сборнике представлены материалы докладов, прочитанных на философском семинаре ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Они посвящены вопросам фундаментальных исследований в области физики твердого тела, астрофизики и проблем эволюции. Значительное место занимают статьи, посвященные ученым-физтеховцам или ученым, связанным с ФТИ своей деятельностью. Сборник рассчитан на широкие круги физиков, интересующихся названными проблемами и историей науки.

Рецензенты

д-р техн. наук В. М. Коликов, д-р физ.-мат. наук С. П. Никаноров

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук Г. Е. Кочаров, д-р физ.-мат. наук В. О. Найденов, канд. филос. наук В. Н. Панибратов, д-р физ.-мат. наук В. И. Сафаров, акад. В. М. Тучкевич (председатель), д-р физ.-мат. наук В. Я. Френкель (составитель).

Ф $\frac{1704010000\text{-}547}{042(02)\text{-}86}$ 131-86—I

© Издательство «Наука», 1986 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Философские семинары в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе АН СССР работают уже более четверти века. Они завоевали заслуженную популярность среди сотрудников института. В связи с этим возникла идея об ознакомлении более широкой аудитории с содержанием некоторых из докладов, прочитанных на семинарах в течение последних двух-трех лет. Представленный сборник и является воплощением этой идеи. Основное его содержание составляют работы, посвященные истории физики нашего века. В сборник помещены статьи по истории открытия экситонов — квазичастиц, последующее изучение которых, начатое в 50-х годах, в большей мере привело к возникновению целой области физики — оптики полупроводников. Другой обширной областью современной физики твердого тела является учение о сегнетоэлектричестве — становлению этой области посвящена специальная статья сборника. Оба направления — физика экситонов и сегнетоэлектричество — начаты в стенах ФТИ. То же можно сказать и о современной физике прочности твердых тел, которая ведет свое начало с классических исследований основателя ФТИ. А. Ф. Иоффе и его сотрудников в 20—30-е годы и которой посвящены две статьи сборника. Еще одна статья первого раздела впервые рассматривает метод встречных пучков в ускорительной технике в его историческом развитии.

Статьи по астрофизике — это уже не столько история, сколько сегодняшний день науки. ФТИ внес свою лепту в развитие соответствующих исследований, и постановке их в институте посвящена специальная статья. Выбор тематики этих докладов на семинарах ФТИ определялся большим влиянием достижений современной космической физики на развитие глубоких философских обобщений, относящихся к пониманию природы материи и ее эволюции. Примыкает к этим статьям и работа, в которой дается набросок эволюции органической материи.

Статьи, включенные в сборник, являются «физтеховскими», т. е. они написаны непосредственно по материалам исследований, выполненных в ФТИ. Физтеховцам посвящены и мемориальные публикации. Одна из статей рассказывает о философских взглядах А. Ф. Иоффе. Несколько статей посвящены акад. А. А. Чернышеву — «русскому Эдисону». А. А. Чернышев был одним из сорат-

ников А. Ф. Иоффе, его заместителем по ФТИ. Чл.-корр. АН СССР П. П. Кобеко, материалы к биографии которого публикуются в сборнике, был директором Ленинградского филиала Физико-технического института в годы войны и заместителем директора ФТИ в первые послевоенные годы. Основоположник советской полупроводниковой электроники О. В. Лосев не являлся сотрудником ФТИ, но был с ним тесно связан в 30-е годы. Статья о нем не только содержит новые данные об этом безвременно погибшем во время блокады Ленинграда ученом, но и включает интересный анализ его работ, произведенный с позиций современной теории полупроводников и приборов на их основе. В этот раздел включена публикация важного в историко-научном плане доклада швейцарского физика В. Паули, сделанного им во время пребывания в СССР в 1937 г. Паули дважды приезжал в СССР и был тесно связан с советскими физиками-теоретиками и с Физико-техническим институтом. Этим связям, а также комментариям к публикации работы одного из основоположников квантовой механики посвящена подробная статья.

Хочется думать, что материалы сборника заинтересуют в равной мере как физиков, так и историков науки. В этом случае можно будет продолжить издание такого рода материалов и надеяться, что примеру Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе последуют и другие академические физические институты.

Академик *В. М. Тучкевич*

ЭКСИТОНЫ, ТВЕРДОЕ ТЕЛО, ПУЧКИ

А. А. Каплянский

ЭКСИТОНЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Из истории открытия, последние исследования в ФТИ

Проблема экситонов в полупроводниках относится к числу тех проблем, в решение которых работами Физико-технического института внесен общепризнанный основополагающий вклад. Эти работы четко разделяются на два этапа. Первый этап — работа Я. И. Френкеля 1931 г., в которой он предсказал существование экситонов как новых нетоковых возбуждений в кристаллах. Это послужило началом теоретического исследования экситонов. Второй этап — это экспериментальное открытие в 1951 г. Е. Ф. Гроссом в этом же институте оптического спектра экситонов в закиси меди, которое явилось началом экспериментального исследования экситонов в полупроводниках.

После открытия Е. Ф. Гросса экситоны были широко исследованы в созданной им в ФТИ лаборатории оптики твердого тела, которая выросла практически благодаря этой проблеме. Исследования экситонов продолжаются в лаборатории и сейчас, когда наряду с экситонной тематикой в ней развиваются и другие направления оптики твердого тела. Задача настоящей статьи заключается в том, чтобы напомнить некоторые основные исторические вехи в исследовании экситонов в полупроводниках и рассказать о наиболее интересных результатах современных исследований.

В теоретической работе Я. И. Френкеля, опубликованной в 1931 г. в журнале Physical Review, была рассмотрена модель кристалла как системы одинаковых слабо взаимодействующих атомов. При этом один атом находится в таком возбужденном состоянии, при котором электрон не оторван от атома. Благодаря трансляционной симметрии кристалла возбуждение не локализуется в этом узле, а распространяется по кристаллу в виде волны возбуждения с определенным волновым вектором **K**. Эту волну возбуждения Френкель соотнес с нейтральной (поскольку ее движение не связано с током) частицей — экситоном. Экситонам с различными волновыми векторами соответствует различная кинетическая энергия, и, следовательно, образуется квазинепрерывная экситонная энергетическая зона. При оптическом возбуждении в такую зону, благодаря сохранению волнового вектора, возможно возбуждение лишь длинноволновых экситонов с малым (равным световому) волновым вектором. Из-за этого оптические переходы совершаются только на дно зоны и в спектре должны

наблюдаться узкие линии. Это заключение было очень важно для экспериментальных поисков экситона.

Надо сказать, что модель, используемая Я. И. Френкелем, лучше всего соответствует структуре молекулярных кристаллов. Поэтому неудивительно, что в физике и оптике молекулярных кристаллов идеи Френкеля были вскоре использованы и развиты И. В. Обреимовым, А. Ф. Прихотько, А. С. Давыдовым для интерпретации эксперимента. Уже в 40-х годах создалась хорошо обоснованная физика экситонов в молекулярных кристаллах.

В полупроводниках дело обстояло иначе. Здесь френкелевская модель кристалла как системы слабо взаимодействующих атомов не соответствовала реальной ситуации и исходной является концепция свободных зонных электронов и дырок. Поэтому для полупроводников более реалистична модель так называемого экситона Ванье—Мотта. Она рассматривает бестоковое возбужденное состояние как результат связывания электрона и дырки силами кулоновского притяжения в некую систему, которая, будучи водородоподобной системой, и есть экситон. Очевидно, в этом случае должна наблюдаться водородоподобная система уровней, отличающихся главным квантовым числом n. Оптический спектр экситона представляет собой водородоподобную серию линий, которая предшествует континууму, означающему уже отрыв электрона от дырки и образование токового состояния. При этом в связи с ослаблением кулоновского взаимодействия в среде энергия связи экситона будет существенно меньше, чем в атоме, а радиус его соответственно больше.

Предсказанный водородоподобный спектр экситона и был обнаружен в 1951 г. Е. Ф. Гроссом в Cu_2O. Чтобы понять значение этого открытия, надо иметь некоторое представление об оптике полупроводников того времени. Начало 50-х годов — это время, когда со всей силой проявились огромные возможности практического использования электрических свойств полупроводников, был изобретен транзистор, и, естественно, электрические исследования в физике полупроводников были доминирующими. Оптике отводилась весьма скромная роль. Исследователей интересовало лишь оптическое значение ширины запрещенной зоны, определяемое из положения края поглощения. Этот край поглощения, по современным понятиям, определялся весьма грубо. Мерой точности измерений служили десятые доли электронвольта, а иногда край находился просто по цвету кристалла.

И вот в такую область исследований пришел выдающийся спектроскопист Е. Ф. Гросс, который к тому времени был широко известным ученым, автором классических работ по обнаружению структуры рэлеевской линии рассеяния света в кристаллах, в которой ширина измерялась уже десятитысячными и стотысячными долями электронвольта. Естественно, он привнес в исследование проблем спектроскопии полупроводников свой подход, который проявился прежде всего в использовании оптики достаточно высокого разрешения. Хорошо знакомый с работами по молекулярным

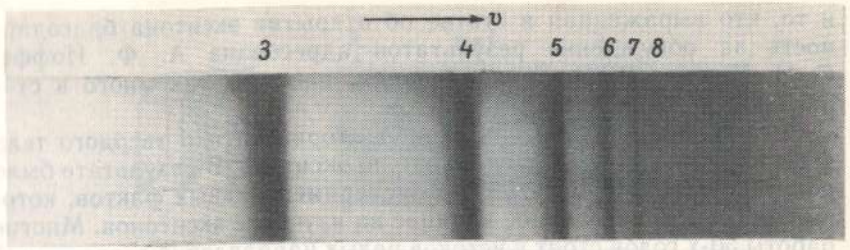


Рис. 1. Спектр водородоподобной серии экситона в кристалле Cu_2O.

кристаллам, Е. Ф. Гросс понимал значение охлаждения кристаллов, вымораживающего колебания и сужающего линии. Первым в его исследованиях по оптике полупроводников был использован кристалл закиси меди — ветеран полупроводниковых материалов, который к тому времени много изучали А. Ф. Иоффе, А. В. Иоффе, В. П. Жузе и другие. Интересно, что В. П. Жузе и С. М. Рывкиным было высказано предположение, что экситоны играют определенную роль в фотоэлектрических явлениях в этом материале.

В первых экспериментах Е. Ф. Гросс и его аспирант Н. Каррыев в кристалле Cu_2O на краю поглощения наблюдали водородоподобную серию. Спектрограмму серии (рис. 1) в актовом зале ФТИ видели неоднократно. Линии здесь прекрасно укладываются в водородоподобную зависимость с главными квантовыми числами 2, 3, 4 и т. д. Имеется и первый слабый член с $n = 1$, отклоняющийся от водородоподобной зависимости.

Наблюдение спектра, свойства которого соответствовали ожидаемым (положение на краю поглощения, водородоподобность и, что очень важно, наблюдение первого члена $n = 1$ — состояния экситона — один этот факт свидетельствует о том, что частица рождается при поглощении света), явилось решающим для утверждения, что вся серия является экситонной. Е. Ф. Гроссом были использованы практически все возможные аргументы, доказывающие принадлежность серии экситону. Более того, при наблюдении серии была получена вся та информация о кристалле, которая дается экситонными исследованиями: например, чрезвычайно точное спектроскопическое определение ширины запрещенной зоны как предела серии; из постоянной Ридберга, которая зависит от констант вещества и от соотношения масс электрона и дырки, были определены эффективные массы электрона и дырки.

Важно, что авторы сразу поняли фундаментальное значение своей работы, поняли, что они обнаружили не курьез, а общее явление в кристаллах. Это видно из того, что уже в первые опубликованные статьи по Cu_2O были включены наблюдения экситонов в других кристаллах, в частности в CdS, чтобы показать общность явления. Первые две работы Е. Ф. Гросса написаны с промежутком в 4 дня, что, по-моему, характеризует волнующую атмосферу этих первых экситонных исследований. Показательно

и то, что выраженная в статье об открытии экситона благодарность за обсуждение результатов адресована А. Ф. Иоффе, С. И. Пекару, В. П. Жузе — людям, внесшим так много в становление физики полупроводников.

Первые работы вызвали в лаборатории оптики твердого тела ФТИ широкий поток исследований по экситону. В результате было получено большое число новых экспериментальных фактов, которые оказали значительное влияние на изучение экситонов. Многие работы 50-х годов стоят у истоков целых направлений современной физики твердого тела. Постараюсь кратко оценить их значение с позиций сегодняшнего дня.

К основным результатам этих работ следует отнести прежде всего доказательство общности явления, исследованного на большом количестве кристаллов. Далее было показано, что экситон является своего рода спектроскопическим представителем зонных свойств, которые имеют фундаментальное значение для физики полупроводников. Экситон, состоящий из электрона и дырки, несет в себе информацию об электроне и дырке соответствующих зон. Уже говорилось об эффективных массах, о пределе серии. Форма линий, распределение интенсивностей, поляризация позволяют много сказать и о положении зон, их минимумах в $\vec{k}$-пространстве, о симметрии зон и т. д. Экситонные серии наблюдались не только на краю поглощения, но и в глубине его, соответствуя различным зонам, которые принимают участие в образовании экситонов.

В работах Е. Ф. Гросса, Н. М. Рейнова, Б. П. Захарчени впервые был исследован эффект Штарка на экситоне. Использовалось внешнее электрическое поле и наблюдалась последовательная ионизация высших экситонных слабо связанных состояний. Это очень интересное наблюдение, ибо оно способствовало преодолению существовавшего психологического барьера — мнения о том, что наблюдать эффекты внешнего электрического поля в оптике кристаллов чрезвычайно трудно, так как для этого будто бы требуются внешние поля, сравнимые с внутрикристаллическими. Эта работа стоит у истоков современной электрооптики, которая получила хорошо известное всем развитие, — работы по электроотражению, электропоглощению очень популярны сейчас в связи с эффектом Франца—Келдыша.

Следующие очень важные исследования были предприняты с использованием магнитного поля. В 1954 г. Б. П. Захарченей и Н. М. Рейновым впервые был исследован эффект Зеемана на экситоне. Это вообще первое магнитоспектроскопическое исследование в полупроводниках. В дальнейшем работами Е. Ф. Гросса и Б. П. Захарчени была развита целая область магнитооптики экситонов, наблюдалось много интересных эффектов. Один из них — диамагнитный сдвиг линий экситона, связанный с большими экситонными радиусами.

В 1957 г. было обнаружено чрезвычайно важное явление магнитооптических осцилляций за пределами экситонных серий,

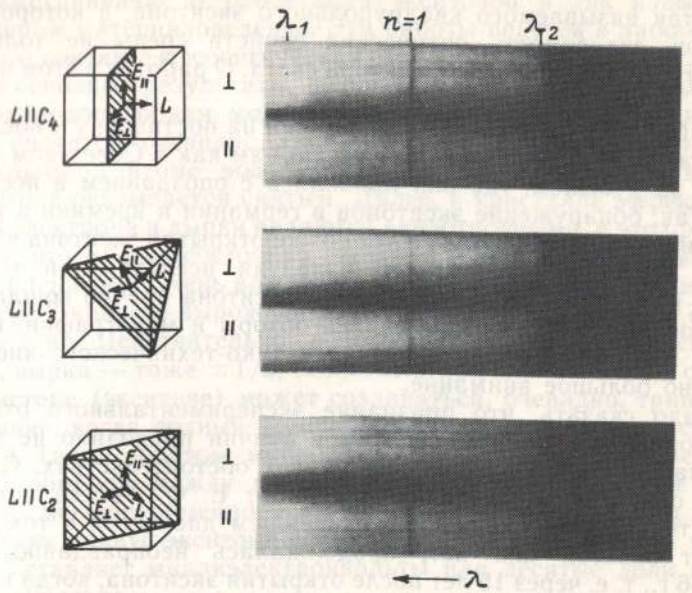


Рис. 2. Линия поглощения экситона $n=1$ кристалла Cu_2O при различных направлениях (L) прохождения света через образец.

что интерпретировалось как переходы в континууме, т. е. переходы между подзонами Ландау, образуемыми в магнитном поле. В дальнейшем это направление широко развивалось. Сейчас оно составляет основу магнитооптики полупроводников и дает богатейшую информацию о зонной структуре кристаллов. В Советском Союзе в этом направлении работали Б. П. Захарченя, Р. П. Сейсян и другие, пришедшие к представлению о так называемых одномерных экситонах, т. е. экситонах, образованных между отдельными подзонами Ландау.

В 1960 г. Е. Ф. Гроссом и автором данной статьи наблюдалось влияние направленной деформации на спектры экситонов в той же закиси меди. Направленная деформация является специфическим, применимым только для кристаллов видом воздействия, которое не может быть использовано в неконденсированных системах. Направленная деформация выступает как фактор, понижающий симметрию кристалла и снимающий вырождение. Сегодня пьезооптика — пьезопоглощение, пьезоотражение полупроводников — является мощным экспериментальным орудием полупроводниковой физики.

В этом направлении был выполнен и ряд других исследований. В частности, Е. Ф. Гроссом и его сотрудниками обнаружена излучательная аннигиляция экситонов, исследовано участие экситонов в люминесцентных и фотоэлектрических явлениях, обнаружено любопытное явление оптической анизотропии в кубических кристаллах в области экситонного поглощения (рис. 2). Это эф-

фект так называемого квадрупольного экситона, в котором проявилась зависимость оптических свойств среды не только от частоты, но и от волнового вектора света. О работах в этом направлении будет сказано ниже.

Работы 50-х годов сильно повлияли на постановку и последующее развитие исследований по экситонам как в Советском Союзе, так и за рубежом, где они появились с опозданием в несколько лет. Так, обнаружение экситонов в германии и кремнии в Англии относится к 1957 г., т. е. на 6 лет позже открытия экситона в закиси меди. В итоге интенсивного развития исследований к концу 50-х—началу 60-х годов концепция экситона прочно вошла в физику полупроводников, появились обзоры и монографии, в частности книга Нокса, где работам Физико-технического института уделено большое внимание.

Надо сказать, что признание экспериментального открытия экситона в нашей стране по ряду причин проходило не гладко. Это нашло свое отражение во многих обстоятельствах. Скажем, сама отправка в печать первых работ Е. Ф. Гросса встретила в институте затруднения. В дальнейшем дискуссия о том, существует экситон или нет, продолжалась неоправданно долго. В 1966 г., т. е. через 15 лет после открытия экситона, когда имелись уже сотни наблюдений, подтверждавших существование экситонов, этот вопрос обсуждался в ФИАН в очень серьезной аудитории, и в воздухе витало некое сомнение в существовании экситона, по крайней мере в отношении широкозонных полупроводников. В «капустниках» в ФТИ слово «экситон» рифмовалось со словом «флогистон». В том, что экситонная гипотеза постепенно вошла в плоть и кровь полупроводниковой физики, мне кажется, сыграли большую роль личные качества Е. Ф. Гросса как полемиста и ученого.

Нужно отметить, что значение науки об экситоне выходит за рамки чисто экситонных исследований. Если сегодня проанализировать исследования по оптике полупроводников, то можно увидеть, что современные стандартные методы спектроскопического исследования — это именно те методы, которые были впервые развиты в 50-х годах в Физико-техническом институте: использование монокристаллов, спектральных приборов высокого разрешения, охлаждение кристаллов, использование внешних магнитных, электрических и деформационных полей. Все это — арсенал современной оптики полупроводников, и для всех этих исследований так или иначе можно проследить связь их с исследованиями 50-х годов.

Посмотрим, что же происходит в экситонных исследованиях теперь, спустя долгие годы после начала их развития. Упомяну о некоторых актуальных направлениях физики экситонов, которые развиваются сейчас в лаборатории оптики твердого тела ФТИ. Это — тонкая структура экситонных состояний, свойства экситонов как квазичастиц, кинетика экситонов, вопросы светоэкситонного взаимодействия — поляритонов и пространственной дисперсии, выстраивание и ориентация экситонов и так называемое экситонное материаловедение. Эти работы ведутся в лаборатории в тесном контакте с теоретическим отделом ФТИ. Кратко охарактеризую основные результаты, полученные в данных направлениях.

Водородоподобная модель экситона при всей своей наглядности является, очевидно, лишь первым его приближением. Действительно, в атоме водорода имеется l-вырождение, которое в экситоне оказывается снятым. Далее, в кристалле эффективные массы электрона и дырки являются анизотропными, и это приводит к тому, что многие состояния экситона в кристалле оказываются расщепленными. Очень важным в кристалле оказывается по крайней мере 2-кратное вырождение электронного и дырочного состояний в зоне. Действительно, если электрон имеет спин, скажем, $\pm 1/2$, дырка — тоже $\pm 1/2$, то при этих значениях спина в связанной системе (экситоне) может создаваться, очевидно, триплетное состояние, когда полный момент равен 1, и синглетное состояние с $S = 0$. Таким образом, имеет место расщепление, которое вызывается обменом между электроном и дыркой и которое существенно меньше обменного взаимодействия в свободном атоме, поскольку радиус экситона велик: обменное расщепление в экситоне составляет миллиэлектронвольты или десятые доли миллиэлектронвольта.

Изучению детальной структуры экситонных состояний препятствует то обстоятельство, что оптические переходы во многие из этих состояний по условиям симметрии запрещены. Поэтому экситонные уровни оказываются для оптики скрытыми и для их изучения надо применять какие-то специальные методы. Это, например, использование внешних полей, которые расщепляют вырожденные состояния и смешивают близкорасположенные уровни, в результате чего в спектрах возгораются ранее запрещенные переходы. Проиллюстрирую это примером на кристалле ZnTe, подвергнутом деформации. Оказывается, что при деформации расщепляется один из уровней, его состояние примешивается к уровню запрещенного экситона. Таким образом, имеется возможность наблюдать запрещенный уровень и исследовать величину обменного расщепления. Работы такого рода широко развивались в последние годы в ФТИ Л. Г. Суслиной, Б. С. Разбириным и другими и привели к детальной интерпретации экситонных спектров во многих полупроводниковых соединениях. В частности, в этих работах, проведенных в тесном взаимодействии с Г. Е. Пикусом и Г. Л. Биром, была исчерпывающе решена проблема обменного взаимодействия в экситоне.

Следующая проблема — поведение экситона как квазичастицы. Действительно, интересно наблюдать те явления, где экситон проявлял себя как частица, обладающая определенным волновым вектором, т. е. импульсом, скоростью, кинетической энергией. Представим, что в экситонной зоне $E(\mathbf{K})$ созданы каким-то образом экситоны. Возникает вопрос, каково распределение по энергии экситонов в зоне? Для этого надо знать концентрацию

экситонов в различных точках зоны. Чисто электронные аннигиляционные переходы, к сожалению, дают нам представление только о том, что происходит на дне зоны, поскольку из-за закона сохранения импульса переходы разрешены только из этой точки. Однако имеется возможность обойти это затруднение, использовав то, что экситоны могут аннигилировать с одновременным рождением в кристалле фотона и фонона. И это сразу упрощает положение. В самом деле, если при аннигиляции экситона из зоны вместе с фотоном рождается фонон, то, очевидно, можно удовлетворить закон сохранения энергии и импульса и становятся возможными излучательные переходы из разных участков экситонной зоны. Рождаются главным образом оптические фононы, обладающие малой дисперсией, т. е. малой зависимостью частоты от **K**. В результате этого спектральный контур фононного спутника, смещенного, естественно, в длинноволновую сторону, будет прямо отражать энергетическое распределение экситонов в зоне. Более того, имеется интересная возможность через эти, так называемые непрямые экситонные переходы селективно возбуждать моноэнергетические потоки экситонов. Это делается путем освещения в такой области энергий, когда в решетке одновременно рождается оптический фонон, обеспечивающий баланс импульсов, и экситон с определенными E и **K**.

Экситон-фононные переходы были использованы для изучения распределения экситонов по энергии в зоне и кинетики этого распределения. Такие исследования проведены в группе С. А. Пермогорова. В CdS, например, наблюдаются как бесфононные экситонные переходы, так и переходы с рождением одного и двух оптических фононов. Распределение в соответствии с формой двухфононной линии близко к максвелловскому, и это показывает, что в данных кристаллах за время жизни экситона в зоне успевает установиться равновесие.

Исследованиями последнего времени показано, как именно происходит эволюция во времени экситона, возбужденного оптически в определенную K-точку зоны. Благодаря взаимодействию с акустическими фононами, испуская их, экситон постепенно скатывается на дно зоны, и это непосредственно проявляется экспериментально в форме экситон-фононного спутника спектра излучения (рис. 3). Видно, как происходит спектральная диффузия и как спектр, сначала сосредоточенный в точке возбуждения, меняется: экситонный пакет деформируется и через достаточно большое время все экситоны скапливаются у дна зоны. Для этих экспериментов не требуется сложной пико- или наносекундной техники, спектры получены в стационарных условиях, а в качестве оптического затвора остроумно использовано собственное время жизни экситона. Изучаются кристаллы с различными временами жизни, определяемыми в основном взаимодействием экситонов с дефектами. В опытах используются образцы с различными концентрациями дефектов, с различными временами жизни экситонов, соответственно их спектры отвечают распределению экситонов

в зоне при различных временах задержки относительно момента возбуждения моноэнергетического начального распределения. Эти эксперименты показывают, что экситоны можно рассматривать как газ, взаимодействующий с акустическими фононами.

Следующее важное направление — светоэкситонное взаимодействие. На рис. 4 представлена известная схема, которая отражает существо проблемы. Пунктиром показаны экситонная и световая ветви. До сих пор предполагалось, что экситоны могут взаимодействовать со светом только в точке пересечения этих ветвей. На самом деле в светоэкситонное взаимодействие включается целая область состояний вблизи резонансной энергии $E_т$. В результате образуются две антипересекающиеся ветви квантовых состояний смешанного светополяризационного типа, так называемых поляритонов. Вдали от $E_т$ эти состояния становятся чисто экситонными и чисто фотонными. Поляритоны обладают свойствами как экситонов (могут рассеиваться на колебаниях решетки), так и света (на границе кристалла поляритон может выйти наружу в виде фотона).

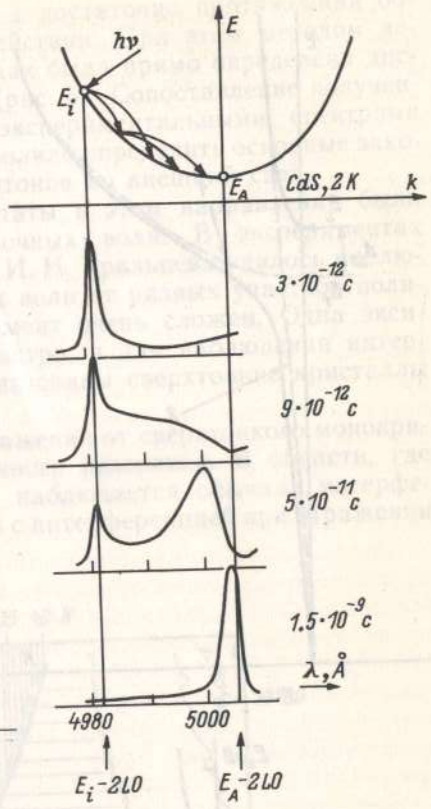


Рис. 3. Схема формирования экситонного излучения в образцах с разным временем жизни экситонов.

Поляритонные состояния в области экситонных резонансов обладают рядом интересных специфических свойств, среди которых принципиальное значение имеет пространственная дисперсия (пространственная нелокальность связи между поляризацией кристалла и возмущающим электрическим полем электромагнитной волны). Основное следствие пространственной дисперсии — это появление добавочных волн: на одной и той же частоте могут возбуждаться две волны одинаковой поляризации, но с разными волновыми векторами. Эти теоретические представления возникли в физике достаточно давно, около 30 лет назад. Они развивались в работах С. И. Пекара, В. Л. Гинзбурга, В. М. Аграновича, Дж. Хапфилда и других. Реальные экспериментальные подтверж-

дения того, что поляритонные ветви и добавочные волны существуют, впервые были получены в лаборатории оптики твердого тела ФТИ.

В работах С. А. Пермогорова, В. В. Травникова, А. В. Селькина непрямым возбуждением удалось селективно заселить отдельные участки экситонной ветви и наблюдать излучение с поляритонной ветви, т. е. доказать, что имеется не

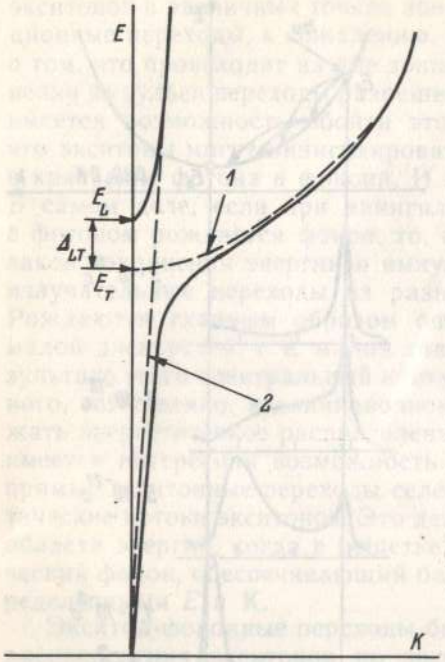


Рис. 4. Дисперсионная кривая поляритонов в области изолированного экситонного резонанса.

Пунктир — дисперсионные кривые невзаимодействующих экситонов и фотонов в кристалле. $1 - E = E_T + \frac{h^2k^2}{2M}$; $2 - E = \frac{hck}{n}$.

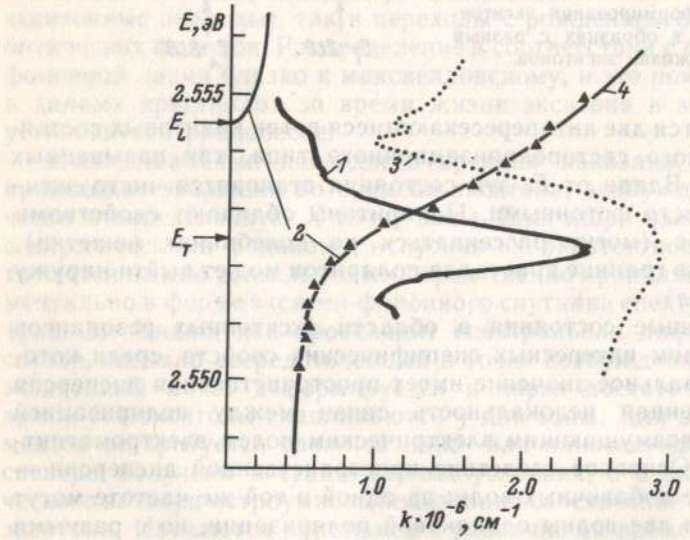


Рис. 5. Сопоставление экспериментальных спектров резонансной экситонной люминесценции (*1*) и отражения (*3*) с дисперсионной кривой поляритонов (*2*) основного экситонного состояния $n=1$ А кристаллов CdS ($T=2$ К).

Экспериментально измеренная дисперсия нижней поляритонной ветви (*4*).

единственная экситонная линия, а достаточно протяженная область светоэкситонного взаимодействия. При этом методом неупругого рассеяния на поляритонах была прямо определена дисперсионная поляритонная ветвь (рис. 5). Сопоставление полученной дисперсионной кривой с экспериментальными спектрами люминесценции и отражения позволило определить основные закономерности превращения поляритонов во внешний свет.

Наиболее интересные результаты в этом направлении были получены при изучении добавочных волн. В экспериментах В. А. Киселева, Б. С. Разбирина, И. Н. Уральцева удалось наблюдать интерференцию добавочных волн от разных участков поляритонных кривых. Этот эксперимент очень сложен. Одна экситонная волна затухает очень быстро, и для наблюдения интерференции двух волн были использованы сверхтонкие кристаллы толщиной 0.1 мк.

На рис. 6 показан спектр отражения от сверхтонкого монокристалла CdSe в области экситонного резонанса. В области, где существует только одна волна, наблюдается обычная интерференция Фабри—Перо, связанная с интерференцией при отражении

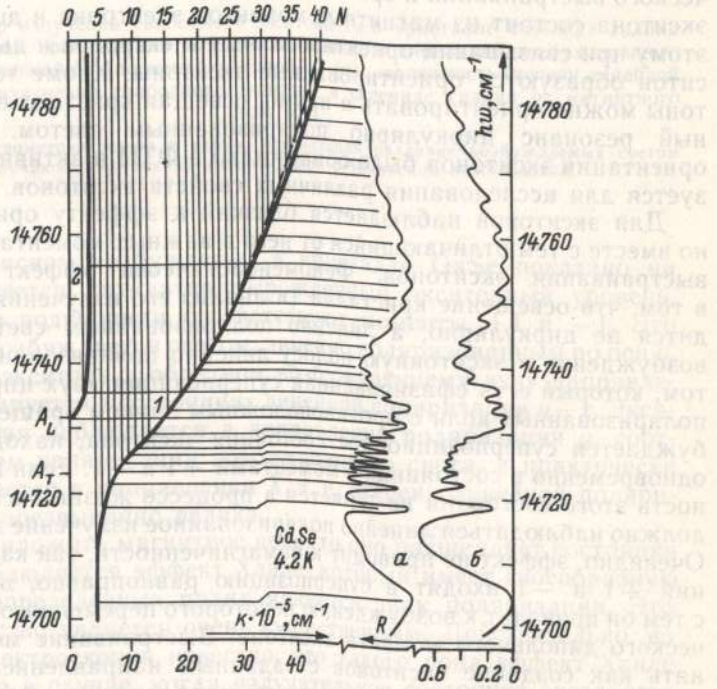


Рис. 6. Связь между дисперсионными ветвями поляритонов *1* и *2* в кристалле CdSe и спектром отражения сверхтонкого кристалла.

а — эксперимент; *б* — теория.

света от передней и задней граней пластинки. Так же широкопериодическая интерференция наблюдается и в области, где превалирует световая ветвь. Однако в области резонанса на интерференцию Фабри—Перо накладывается дополнительная структура, которая, как было показано, обусловлена интерференцией двух поляритонных волн. Приведенная на рис. 6 расчетная кривая использует предполагаемый вид двух поляритонных кривых, которые описываются величиной эффективной массы экситонов, продольно-поперечным расщеплением, затуханием волны. Получено очень хорошее согласие с опытом, что служит непосредственным подтверждением эффекта добавочных волн.

Метод наблюдения спектров в сверхтонких кристаллах представляется весьма перспективным для экситонной физики, ибо здесь фактически наблюдается целая область светоэкситонного взаимодействия, что дает возможность очень точно определять параметры поляритонных ветвей. Эти исследования важны, как оказалось, и для изучения воздействия поверхности на экситон, так как детали интерференционной структуры зависят от характера взаимодействия экситонов с поверхностью.

Несколько слов о направлении, связанном с наблюдением оптического выстраивания и ориентации экситонов. Магнитный момент экситона состоит из магнитных моментов электрона и дырки. Поэтому при связывании ориентированных электронов и дырок в экситон образуются ориентированные экситоны. Кроме того, экситоны можно ориентировать и прямо, освещая кристалл в экситонный резонанс циркулярно поляризованным светом. Явление ориентации экситонов было обнаружено в ФТИ и активно используется для исследования различных свойств экситонов.

Для экситонов наблюдается близкий к эффекту ориентации, но вместе с тем отличающийся от него в важных моментах эффект выстраивания экситонов. Феноменологически эффект состоит в том, что освещение кристалла (и анализ его излучения) проводится не циркулярно, а линейно поляризованным светом. При возбуждении в экситонную полосу линейно поляризованным светом, который есть сфазированная суперпозиция двух циркулярно поляризованных волн с противоположным знаком вращения, возбуждается суперпозиционное состояние экситона, находящегося одновременно в состояниях с моментами $+1$ и -1. Если когерентность этого состояния не теряется в процессе жизни экситона, то должно наблюдаться линейно поляризованное излучение экситона. Очевидно, эффект не приводит к намагниченности, так как состояния $+1$ и -1 входят в суперпозицию равноправно, но вместе с тем он приводит к возбуждению некоторого переменного электрического дипольного момента экситона. Выстраивание можно понять как создание экситонов с заданным направлением линейного диполя, которое соответствует направлению поляризации падающего поля.

Работы этого направления проводятся Б. С. Разбириным и А. Н. Старухиным. Обнаруженное ими выстраивание экситонов

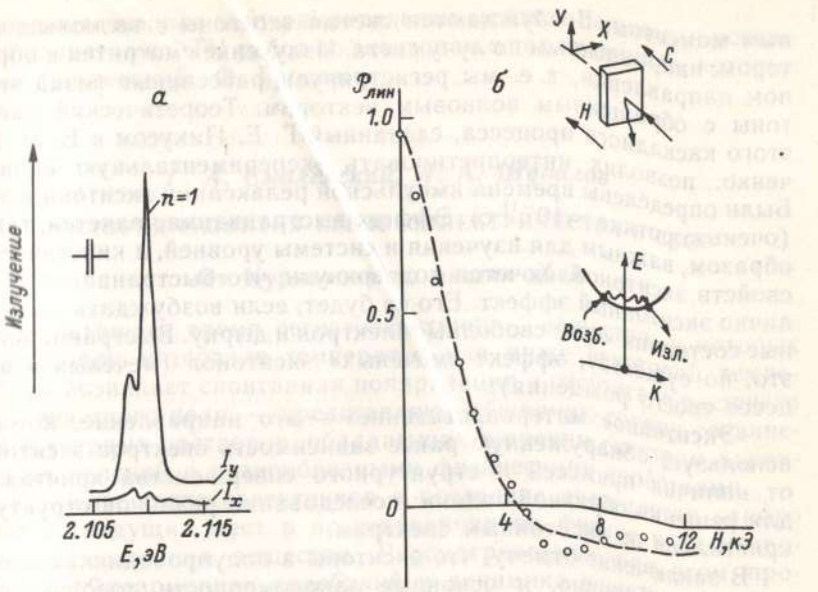


Рис. 7. Спектр излучения свободного экситона Γ_6 в кристалле селенида галлия при резонансном возбуждении для двух линейных поляризаций возбуждающего света (параллельной I_Y и перпендикулярной I_X) (*а*); зависимость степени линейной поляризации излучения свободного экситона в селениде галлия от магнитного поля (*б*).

На вставке — геометрия опыта и схема, поясняющая различие возбуждаемых светом и излучающих состояний экситонов при резонансном возбуждении.

при резонансном возбуждении в кристалле GaSe показано на рис. 7. Имеется двукратно вырожденный экситонный уровень, так что его подуровням соответствуют моменты $+1$ и -1. Это состояние возбуждается светом, линейно поляризованным по оси y. Излучение экситона в обратном возбуждающему лучу направлении анализируется в состояниях линейной поляризации $y—x$. Экситонная линия наблюдается в направлении поляризации y, соответствующем поляризации возбуждающего света, и практически не наблюдается в направлении X, т. е. степень линейной поляризации $P_{лин}$ чрезвычайно велика.

Если приложить магнитное поле, то оно расщепляет состояния с ∓ 1 и наблюдается эффект Ханле, который имеет своеобразную форму: в определенных полях меняется знак поляризации. Это обстоятельство является очень существенным. Действительно, из атомной спектроскопии известно, что такого рода эффект Ханле имеет место в случае, когда излучательное состояние заселяется не прямо, а каскадно, через какие-либо другие состояния. Эта идея была использована и для объяснения особенностей эффекта Ханле экситонов. Оказалось, что каскадность связана с любопыт-

ным моментом. Возбуждаются светом экситоны с волновым вектором, направленным по лучу света. Излучение смотрится в обратном направлении, т. е. мы регистрируем рассеянные назад экситоны с обращенным волновым вектором. Теоретический расчет этого каскадного процесса, сделанный Г. Е. Пикусом и Е. Л. Ивченко, позволил интерпретировать экспериментальную кривую. Были определены времена импульсной релаксации экситона в зоне (очень короткие $\sim 10^{-11}$ с). Эффект выстраивания является, таким образом, важным для изучения и системы уровней, и кинетических свойств экситонов. Хочется подчеркнуть, что выстраивание — типично экситонный эффект. Его не будет, если возбуждать экситонные состояния через свободные электрон и дырку. Выстраивание — это, по существу, эффект «меченых» экситонов (меченых в процессе своего рождения).

«Экситонное материаловедение» — это направление, которое использует обнаруженную ранее зависимость спектров экситонов от наличия примесей и структурного совершенства кристаллов для решения обратной задачи: исследования реальной структуры кристаллов по экситонным спектрам.

В заключение отмечу, что экситоны в полупроводниках исследуются уже давно, и основные закономерности хорошо установлены. Для современного состояния экситонных исследований характерна чрезвычайная прецизионность экспериментальных методов и детальность в исследованиях статических и кинетических свойств экситонов. Экспериментаторы умеют, например, создавать экситонные пучки с заданными параметрами: энергией, волновым вектором, направлением момента, дипольным моментом. Хорошо, когда эксперимент достигает такого уровня. Но при этом возникает вопрос, не является ли это также признаком близкого отмирания проблемы. Нам представляется, что это не так, и положение это связано с той объективной ролью, которую играют экситоны в физике полупроводников. По существу, экситоны — это третий вид электронных состояний в полупроводниках (наряду с зонными состояниями электронов и дырок и локальными состояниями, связанными с примесями и дефектами). Экситонные бестоковые состояния естественным образом проявляются в большинстве физических свойств полупроводников. Есть свойства, где роль экситонов является доминирующей. Это прежде всего оптические свойства. По существу, экситоны определяют всю оптику полупроводников, все особенности структуры спектров. Поэтому при любых оптических исследованиях необходимо учитывать, что первым шагом оптического возбуждения является во многих случаях рождение экситонов. Велика их роль также в процессах в возбужденном состоянии твердого тела. Она обусловлена тем, что энергетическое положение экситонов ниже положения свободных электрона и дырки, поэтому они обязательно связываются в экситон, особенно при низких температурах. Таким образом, есть все основания полагать, что экситонная физика всегда будет существенной частью физики полупроводников. Дальнейшее

совершенствование экспериментальных методов важно для успешного развития в ФТИ работ по экситонам в тех традициях, которые были заложены Е. Ф. Гроссом.

Г. А. Смоленский, Л. А. Шувалов

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСТВА В СССР

От Курчатова до наших дней

В настоящее время сегнетоэлектрики — вещества, у которых в некотором интервале температур или ниже некоторой температуры возникает спонтанная поляризация в отсутствие внешнего электрического поля, — представляют обширную группу соединений и твердых растворов, обладающих широким спектром характерных явлений и разнообразными физическими свойствами.

Изучение сегнетоэлектриков в последние десятилетия заняло одно из ведущих мест в исследованиях по физике конденсированного состояния вещества. Рассматриваемые при этом проблемы — ангармонизм колебаний и динамика решетки, фазовые переходы, критические и нелинейные явления, электрон-фононные взаимодействия и т. д. — имеют общее физическое значение.

Изучение сегнетоэлектриков — это не только фундаментальные исследования, расширяющие наши знания о природе твердых тел. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы находят все более широкое применение во многих разделах современной техники. Их народнохозяйственное значение трудно переоценить. Они используются для изготовления радиотехнических конденсаторов, пьезоэлектрических преобразователей и фильтров и являются практически единственными материалами для гидроакустических устройств, пироэлектрических приемников инфракрасного излучения, в устройствах обработки и хранения информации, в радио-, акусто- и оптоэлектронике. Сегнетоэлектрики особенно эффективны при работе в условиях, требующих высокой радиационной стойкости.

Дальнейший прогресс в поиске, исследовании и разработке новых сегнетоэлектрических и родственных материалов и новых принципов их применений будет в значительной мере определять развитие указанных областей новой техники.

Анализ состояний и тенденций развития науки о сегнетоэлектричестве и его практических приложениях позволяет утверждать, что как в фундаментальном, так и в прикладном плане исследование этой группы материалов в ближайшие десятилетия будет оставаться на переднем крае науки и техники.

Сегнетоэлектрики все время пополняются новыми группами веществ: сегнетоэластиками, сегнетомагнетиками, сегнетоэлектрическими жидкими кристаллами, сегнетоэлектрическими полимерами, композитами.

На примере сегнетоэлектриков можно диалектически проследить, как происходило развитие новой области науки, отдать должное интуиции и прогнозам, высказанным пионерами, работавшими в этой области. Так, И. В. Курчатов 50 лет тому назад писал: «. . .можно думать, что только с развитием общих представлений о структуре твердого тела удастся разыскать новые сегнетоэлектрики: но, вместе с тем, кажется несомненным, что эта задача будет успешно разрешена и на пути решения будут получены результаты, в свою очередь существенные в общих вопросах строения материи».* Ниже будет показана справедливость этого положения на примере как обнаружения новых сегнетоэлектриков, так и получения новых данных о строении материи.

В конце 20-х годов в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе И. В. Курчатовым с сотрудниками были начаты исследования сегнетовой соли. Игорь Васильевич предложил термины «сегнетоэлектричество» и «сегнетоэлектрики», которые ныне приняты в литературе в СССР и в ряде других стран. Уже тогда им и его сотрудниками были получены обширные результаты, положившие начало многим последующим работам. В процессе исследования было выяснено, что электрические особенности кристаллов сегнетовой соли не связаны, как тогда предполагалось, с явлениями высоковольтной поляризации и представляют собой особый класс явлений. В этих исследованиях были изучены свойства сегнетовой соли и твердых растворов на ее основе, установлена сильная зависимость физических свойств от внешних воздействий, обнаружен эффект униполярности и релаксационные явления, развита молекулярная теория сегнетоэлектричества. Эти результаты были обобщены И. В. Курчатовым в его монографии о сегнетоэлектричестве.

В дальнейшем, в 30-е годы, эти исследования были направлены на практические применения сегнетовой соли. В. Вологдин предложил использовать сегнетову соль для умножения частоты, положив начало применения нелинейных диэлектрических свойств сегнетоэлектриков. Изучение Г. М. Михайловым пьезоэлектрических и упругих свойств сегнетовой соли привело в 40-е годы к использованию сегнетовой соли, а затем и кристаллов дигидрофосфата калия — KDP в электро- и гидроакустике. Этому способствовала разработка методов выращивания крупных кристаллов сегнетовой соли и KDP (Н. Н. Шефталь и др.).

В годы войны в осажденном Ленинграде вышла книга В. Н. Лепешинской «Сегнетова соль и ее применения».

Занимаясь в Физическом институте АН СССР поиском диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью, Б. М. Вул обнаружил (1943—1944 гг.) сегнетоэлектрические свойства у титаната бария, открыв тем самым новый этап в истории сегнетоэлектричества. Этот кристалл обладает интересными свойствами.

* *Курчатов И. В.* Сегнетоэлектричество. Л.; М.: ГТТИ, 1933, с. 7.

Прежде всего он кристаллизуется в простой структуре перовскита. Кроме того, титанат бария отличается высокой диэлектрической проницаемостью, большим пьезомодулем, удобной для технических применений температурой Кюри (120 °С), большой механической прочностью, термической устойчивостью, тогда как сегнетова соль имеет низкую температуру Кюри (24 °С), гигроскопична и механически не прочна. Еще одна интересная особенность титаната бария — этот кристалл является многоосным сегнетоэлектриком, т. е. в нем существует несколько возможных направлений спонтанной поляризации, — в противоположность сегнетовой соли, которая является одноосной. Поэтому его можно использовать для технических применений в виде поликристаллов (керамики), а не в виде дорогостоящих монокристаллов. При воздействии электрического поля на такой кристалл в нем происходит ориентация доменов, которая сохраняется и после снятия поля. Таким образом, создается как бы квазикристалл. Кроме того, используя обычную керамическую технологию, из поликристаллического титаната бария можно изготовить изделия практически любой формы и размеров из достаточно дешевых окислов или солей соответствующих металлов. Все эти свойства титаната бария сыграли большую роль в развитии работ по физике сегнетоэлектриков и их техническим применениям.

В течение определенного времени (1944—1948 гг.) предполагалось, что среди перовскитов титанат бария является единственным сегнетоэлектриком. Но затем в результате исследований физиков, работающих ныне в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе (Г. А. Смоленского, В. А. Исупова, В. А. Бокова, Н. Н. Крайник), было доказано, что в действительности многие перовскиты переходят в сегнетоэлектрическое состояние. Множество сегнетоэлектриков было обнаружено в многокомпонентных системах. Известно, что для изучения диаграммы состояний многокомпонентных систем требуются многие месяцы, иногда годы. Для преодоления этих трудностей были предложены некоторые простые принципы «конструирования» сложных соединений. Они сводятся к следующему: необходимо соблюдение электрической нейтральности, выполнение геометрических особенностей элементарной ячейки, основанных на данных о размерах ионов и пустотах в решетке, а также на учете склонности ионов к определенным координационным числам. Эти принципы позволили в сравнительно сжатые сроки синтезировать большое число сегнетоэлектриков сложного состава. При этом были сформулированы требования к электронным оболочкам сегнетоактивных ионов. В настоящее время эти идеи широко используются во всем мире. Наряду с исследованиями, проведенными в Физико-техническом институте, здесь следует отметить также работы сотрудников Ростовского государственного университета (Н. С. Новосильцева, А. Л. Ходакова, Е. Г. Фесенко) и Московского физико-химического института им. Л. Я. Карпова (Г. С. Жданова, Ю. Н. Веневцева).

В 40-е годы А. В. Шубников, опираясь на свое учение о пьезоэлектрических текстурах, получил и изучил текстуры из сегнетовой соли. В 1948 г. в Институте кристаллографии АН СССР впервые были оптически обнаружены домены в сегнетовой соли (М. В. Классен-Неклюдова, М. А. Чернышева) и началось все более интенсивное кристаллофизическое исследование сегнетовой соли, а затем и других водородсодержащих сегнетоэлектриков. В 50-е годы были установлены общие кристаллографические закономерности доменной структуры сегнетоэлектриков. С помощью принципа Кюри впервые была решена задача об изменении симметрии при всех возможных сегнетоэлектрических фазовых переходах (И. С. Желудев, Л. А. Шувалов). Обнаружено специфическое влияние проникающих излучений на свойства сегнетоэлектриков (В. А. Юрин). Подробно изучены физические свойства кристаллов типа триглицинсульфата, в том числе при импульсном переключении напряжения (В. П. Константинова, К. С. Александров, Л. А. Шувалов, Н. М. Сильвестрова).

Вскоре после открытия титаната бария В. Л. Гинзбург (1946—1949 гг.), эффективно применив теорию фазовых переходов Л. Д. Ландау, создал феноменологическую теорию сегнетоэлектричества, которая до сих пор лежит в основе всех термодинамических описаний сегнетоэлектриков. Затем в развитие идей И. В. Курчатова были созданы так называемые модельные теории. Их сущность заключается в следующем. Рассматривается потенциальный рельеф сегнетоактивного иона, который совершает ангармонические колебания в решетке. Здесь важно отметить, что сегнетоэлектрические явления можно объяснить только в ангармоническом приближении, поскольку при решении уравнения движения иона в гармоническом приближении для смещения иона получается либо нулевое значение, либо бесконечность. Итак, форма потенциального рельефа для сегнетоактивного иона должна быть задана с учетом ангармонизма. Потенциальный рельеф представляет собой широкую потенциальную яму или яму с несколькими локальными минимумами.

Отсюда возникла идея, что сегнетоэлектрики можно разбить на два класса: сегнетоэлектрики типа смещения, у которых постоянный дипольный момент в параэлектрической области отсутствует и возникает только в результате смещения ионов в сегнетоэлектрических областях, и сегнетоэлектрики типа порядок—беспорядок, в которых уже имеются диполи, как в свое время представлял себе И. В. Курчатов для сегнетовой соли и Ланжевен — для парамагнетиков. При фазовом переходе происходит упорядочение диполей. Модельные теории, конечно, являются приближенными, и, если провести расчеты, то оказывается, что они не дают количественного согласия с опытом. Но вместе с тем эти модельные теории в силу своей наглядности сыграли положительную роль в развитии физики сегнетоэлектриков.

Современной теорией этого класса веществ является так называемая динамическая теория. Она была создана В. Л. Гинзбургом и исходит из того, что рассматриваются не ионы, а колебания решетки — фононы. Отсюда возникла очень интересная идея о мягкой фононной моде. При приближении к фазовому переходу частота одной из фононных мод резко уменьшается. «Смягчение» частоты объясняется компенсацией коротко- и дальнодействующих сил. Следует заметить, что эта идея является весьма общей и реализуется в других типах фазовых переходов. На ее основе стали быстро развиваться оптические и радиоскопические исследования сегнетоэлектрических кристаллов. При этом использовался большой экспериментальный арсенал методик: медленные нейтроны, инфракрасное поглощение, квазиоптика, комбинационное и мандельштам-бриллюэновское рассеяние света, радиоспектроскопия, диэлектрические и акустические исследования при высоких частотах (В. Н. Мурзин, Г. В. Козлов, Ю. М. Поплавко, О. Г. Вендик, И. В. Иванов, И. П. Григас, И. Г. Синий, С. Д. Прохорова, Д. Ф. Байса и др.).

Кроме мягких мод, вблизи фазовых переходов был обнаружен центральный пик, который возникает в результате взаимодействия этих мод с низкочастотными колебаниями решетки.

Разработана также вибронная теория сегнетоэлектричества, учитывающая электрон-фононное взаимодействие (М. Б. Берсукер, Н. Н. Кристофель).

Продолжавшиеся в 60-е годы поиск и исследование кислородно-октаэдрических сегнетоэлектриков с поливалентными ионами, находящимися в одинаковых кристаллографических положениях в решетке, привели к открытию сегнетоэлектриков с размытыми фазовыми переходами и нового класса веществ с одновременно электрическим и магнитным упорядочением, названных сегнетомагнетиками (Г. А. Смоленский, В. А. Боков, В. А. Исупов, Н. Н. Крайник). Сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом представляют большую группу веществ, относящихся к неупорядоченным и неравновесным системам и получивших широкое применение в конденсаторостроении. В сегнетомагнетиках обнаружен ряд новых эффектов, и в частности, зависимость поляризации от магнитного поля и намагниченности — от электрического поля. Были начаты исследования большой группы сегнетоэлектриков-полупроводников, в том числе сульфаиодида сурьмы (В. М. Фридкин), в которых были обнаружены взаимодействия электронной подсистемы со спонтанной поляризацией.

Потребности лазерной техники привели к широкой постановке электрооптических исследований различных кристаллов, в том числе сегнетоэлектрических (А. С. Сонин, Л. А. Шувалов, К. С. Александров и др.).

В конце 60-х годов и в 70-е годы были сильно продвинуты микроскопические модельные и статистические теории сегнетоэлектричества (В. Г. Вакс, Н. М. Плакида и др.). Стала бурно развиваться феноменологическая теория, к достижениям которой относится разработка сначала теории несобственных, а затем

соразмерных переходов вообще и в конкретных кристаллах, в частности (В. Л. Инденбом, А. П. Леванюк, Д. Г. Санников, Ю. М. Гуфан). Оказалось, что в ряде сегнетоэлектриков, получивших название несобственных, спонтанная поляризация возникает как вторичный эффект.

Следует также упомянуть о сегнетоэластиках, которые можно рассматривать как упругие аналоги сегнетоэлектриков (Л. А. Шувалов, Е. Ф. Дудник). Их можно также разделить на собственные и несобственные. В собственных сегнетоэластиках фазовый переход обусловлен смягчением длинноволновых акустических фононов, тогда как в собственном сегнетоэлектрике — смягчением длинноволновых оптических фононов.

Большой интерес представляет изучение несоразмерных фаз. Эти фазы наблюдаются во многих средах: в металлах, полупроводниках, сегнетоэлектриках, магнитоупорядоченных структурах, ионных и жидких кристаллах. В сегнетоэлектриках в несоразмерной фазе спонтанная поляризация изменяется в пространстве по синусоиде, период которой несоразмерен с периодом элементарной ячейки исходной фазы и много больше ее. Период модуляции составляет 100—1000 Å и меняется с изменением температуры. Обычно наблюдается следующая последовательность фаз при понижении температуры: параэлектрическая несоразмерная сегнетоэлектрическая и упорядоченная сегнетоэлектрическая. Эти результаты были получены методами радиоспектроскопии (И. П. Александрова), субмиллиметровой спектроскопии (Г. В. Козлов), новым методом измерения макроскопического квадрупольного момента (В. В. Гладкий) и др.

В эти же годы был обнаружен ряд новых эффектов. Открыт и исследован эффект электрогирации — изменения или возникновения оптической активности в электрическом поле (И. С. Желудев и О. Г. Влох).

Отметим открытие фононного эха, т. е. эффекта возникновения отклика через определенный промежуток времени после воздействия на кристалл двух электромагнитных импульсов (С. Н. Попов, Н. Н. Крайник, А. Р. Кессель и др.). Возникновение эха есть результат восстановления когерентности акустических колебаний, возбуждаемых радиоимпульсами. Особенно интересным оказалось трехимпульсное эхо, когда третий импульс подается на образец через несколько месяцев после приложения двух предыдущих. Тем самым было обнаружено явление памяти как результат декорирования кристалла, т. е. перераспределения в нем примесей при воздействии первых двух импульсов.

Изучение фоторефракции и фотогальванического эффекта (В. М. Фридкин, М. П. Петров, В. И. Белиничер, Б. И. Стурман, Е. Л. Ивченко, Г. Е. Пикус и др.) при освещении однородных прозрачных кристаллов показало, что в них возникает фотонапряжение (в разомкнутой цепи), которое для высокоомных сегнетоэлектриков достигает десятков киловольт. Рассмотрен механизм фотогальванических эффектов, который базируется на фундамен-

тальном факте асимметрии элементарных электронных процессов в кристаллах без центра инверсии.

Разработана методика визуализации динамики доменов с помощью жидких кристаллов, установлен ряд закономерностей динамики доменной структуры и, что особенно важно, способов управления ею (Л. А. Шувалов, Н. А. Тихомирова).

Среди работ, относящихся к новым классам материалов, следует отметить работы по сегнетоэлектрическим жидким кристаллам: разработка теории (В. Л. Инденбом, С. А. Пикин), экспериментальные исследования (Б. А. Струков, А. А. Сонин).

Постепенно расширяются исследования различными методами влияния дефектов на сегнетоэлектрические свойства кристаллов, проводившиеся ранее в традиционном кристаллохимически-эмпирическом плане. В настоящее время для области вблизи точки Кюри эти исследования опираются на теорию, разработанную А. П. Леванюком, А. С. Сиговым, А. И. Соколовым и др.

Последние годы большое внимание уделяется выращиванию различными методами, исследованию и использованию в интегральной оптике тонких пленок сегнетоэлектриков и родственных материалов и слоистых систем (В. А. Дудкевич, Б. Я. Томашпольский).

Исследованию сегнетоэлектриков в диапазоне СВЧ посвящены работы О. Г. Вендика, И. В. Иванова, Ю. М. Поплавко, Э. В. Бурсиана. Здесь интересные результаты получены при изучении нелинейных свойств взаимодействия электромагнитных колебаний с решеткой и диэлектрических потерь. В частности, созданы материалы на основе виртуальных сегнетоэлектриков с минимальными потерями — результаты, важные для применений сегнетоэлектриков в качестве фазовращателей.

Большое внимание проявляется сейчас к дипольным стеклам, в которых диполи зафиксированы в различных направлениях. В этом плане интересны исследования виртуального сегнетоэлектрика — танталата калия с нецентральной примесью лития. До сих пор не удается установить, при какой концентрации лития происходит в этом кристалле фазовый переход в сегнетоэлектрическое состояние при низкой температуре, а при какой образуется дипольное стекло (Г. А. Смоленский, Н. К. Юшин).

Акустика твердого тела, в том числе нецентросимметричных кристаллов, каковыми являются сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики, представляет собой один из бурно развивающихся в последние годы разделов физики твердого тела. Значительный вклад в развитие этой области внесли советские ученые. Еще в 30-е годы появились теоретические работы А. И. Ахиезера, Л. Д. Ландау и Ю. Б. Румера, в которых рассматривались механизмы решеточного затухания высокочастотных акустических волн в кристаллах. В работах К. С. Александрова и Ф. И. Федорова были рассмотрены основные особенности распространения акустических волн в анизотропных средах. Для развития экспериментальных методов акустики твердого тела определяющими явились

работы С. Я. Соколова и К. Н. Баранского, которым впервые удалось возбудить в кристаллах акустические волны с гиперзвуковой частотой и исследовать их распространение. В дальнейшем различные аспекты высокочастотной акустики твердого тела развивались в работах Г. А. Смоленского, В. В. Леманова, В. А. Красильникова, Ю. В. Гуляева, С. В. Богданова и др.

Важный этап в развитии акустики твердого тела составляла разработка основ акустоэлектронного взаимодействия в пьезоэлектрических полупроводниках (В. Л. Гуревич, В. И. Пустовойтов и др.). В развитие физики поверхностных акустических волн в пьезоэлектриках большой вклад внесли И. А. Викторов и Ю. В. Гуляев. Интересные работы по взаимодействию вторичных электронов с поверхностными волнами в сегнетоэлектриках (ниобат лития) и пьезоэлектриках выполнили В. В. Леманов и А. Б. Шерман. Этот цикл работ имеет существенное практическое значение в связи с созданием устройств для корреляционной обработки сигналов и других целей.

Очень важный в теоретическом и практическом отношениях раздел акустики твердого тела составляет акустооптика. Возможность взаимодействия оптических и акустических волн в твердых телах была, как известно, предсказана Л. И. Мандельштамом и Л. Бриллюэном еще в 20-х годах. Вскоре это предсказание было экспериментально подтверждено в работах П. Дебая, Е. Ф. Гросса и др. Особенно бурное развитие акустооптика получила после изобретения лазеров. Научные и прикладные аспекты акустооптики развивались в работах И. Л. Фабелинского, Г. А. Смоленского, В. В. Леманова, С. В. Кулакова, С. В. Богданова, Ю. В. Гуляева и др.

Широкие возможности открывает применение сегнетоэлектрических материалов для световодов в интегральной оптике. В световодах удается реализовать высокие плотности излучения, что позволяет исследовать нелинейные оптические и акустооптические взаимодействия. Обнаружена генерация гармоник в условиях синхронизма, вызванного пересечением различного типа мод; наблюдалось вынужденное мандельштам-бриллюэновское рассеяние света, приводящее к обращению волнового фронта; обнаружена оптическая бистабильность в интегрально-оптическом коммутаторе из ниобата лития. Показана возможность применения пироэлектрического и фотогальванического эффектов для регистрации оптического излучения в волноводе, что позволяет создать соответствующую интегрально-оптическую схему.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили устройства на основе диффузионных градиентных световодов, получаемых с помощью термодиффузии титана в ниобат лития. Использование электрооптических и акустооптических взаимодействий привело к созданию многих функциональных элементов интегральной оптики, которые зачастую намного превосходят объемные аналоги (А. М. Прохоров, В. В. Леманов, А. Н. Агеев и др.).

Заканчивая настоящий обзор, подчеркнем, что за сравнительно небольшой период времени, отделяющий современную физику сегнетоэлектричества от ранних исследований И. В. Курчатова, эта область науки быстро развивалась и вглубь и вширь, обогащаясь новыми физическими идеями. Это привело к открытию ряда новых материалов и разработке принципов их применений. Следует особо подчеркнуть, что советскими учеными внесен большой вклад в науку о сегнетоэлектричестве.

Л. С. Стильбанс

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО В ФТИ

Прошлое, настоящее, будущее

Введение

Термоэлектрическая энергетика — одна из новых областей науки и техники, рождение которой неразрывно связано с Советской властью, Физико-техническим институтом АН СССР и с именем известнейшего советского ученого академика А. Ф. Иоффе, предвидевшего ее большое будущее еще на заре индустриализации.

Острая потребность в термоэлектрических генераторах возникла в последние годы в связи с необходимостью автономных источников питания для космических объектов, автоматических метеостанций, маяков, буев и других труднодоступных и удаленных объектов. Эти и многие другие задачи успешно решаются сейчас при помощи термобатарей в комбинации с изотопными, реакторными источниками тепла и источниками тепла, работающими на органическом топливе.

Достижения в области теории твердого тела и полупроводниковой технологии обеспечили возможность быстрого развития термоэлектрической энергетики. В ФТИ — также под руководством А. Ф. Иоффе — родилась еще одна область термоэлектрического преобразования энергии, нашедшая в настоящее время широкое применение в различных областях науки и техники, — термоэлектрическое охлаждение и термостатирование. К концу XI пятилетки наши ученые подходят с серьезными достижениями в этих новых областях науки и техники.

История термоэлектрического преобразования энергии не похожа на триумфальное шествие ядерной физики, космических исследований, полупроводниковой электроники или лазерной техники. Тем не менее наука о термоэлектричестве стала в настоящее время неотъемлемой частью физики твердого тела и, как мы уже упоминали, теоретической основой ряда отраслей техники. Это дает основания для изучения ее эволюции. Кроме этого, история исследований термоэлектричества интересна и в познавательном

отношении — на ее примере очень отчетливо видны и относительная независимость теории, и ее (взаимная) связь с уровнем техники и с потребностями общества. Так, на протяжении почти двух столетий с момента открытия термоэлектричества соответствующие теоретические и экспериментальные исследования, а также работы, направленные на его практическое использование, много раз испытывали подъем и затухание; исследования повторялись на тех же веществах, но более чистых или более совершенными методиками. Приборы, не нашедшие устойчивого применения, забывались и, спустя много лет, «изобретались» вновь. Даже в области теории не всегда осуществлялась преемственность — те же или почти те же соотношения выводились независимо несколько раз.

Сказанное выше свидетельствует в какой-то мере о неэкономном расходовании сил отдельных ученых и общества в целом. Большими преимуществами обладает та отрасль науки, которая развивается при тесном взаимодействии ученых — будь то неофициальное международное содружество или единый научный центр. В этом случае преемственность практически исключает ненужные повторения проведенных раньше исследований.

Очень показательна история развития рассмотренных работ в ФТИ, где на протяжении полувека исследования в области термоэлектричества проводились в тесном содружестве физиков (экспериментаторов и теоретиков), металлургов и химиков, технологов и конструкторов. По мере продвижения вперед в работу вовлекались все новые институты и заводы различных министерств и ведомств. Следуя своим традициям, А. Ф. Иоффе и весь коллектив ФТИ вел работы в области термоэлектрического преобразования также в тесном контакте с вузами и республиканскими академиями наук. При этом бывшие сотрудники, аспиранты и докторанты ФТИ, а также ученики школы Абрама Федоровича в дальнейшем возглавили работу в области термоэлектрического преобразования энергии больших коллективов. Излагая историю термоэлектричества в ФТИ, мы не будем проводить грани между работами ФТИ и упомянутых выше коллективов.

Термоэлектрическими явлениями называются явления термоэдс, Пельтье и Томсона. Явление термоэдс, открытое Зеебеком в 1821 г., состоит в том, что в цепи, состоящей из разнородных материалов, возникает эдс (dE), если места контактов поддерживаются при различных температурах, разность которых равна dT:

$$dE = \alpha_{1,2} dT, \tag{1}$$

где α — так называемый коэффициент термоэдс, или коэффициент Зеебека.

Цепь, в простейшем случае состоящая из двух различных материалов, называется термоэлементом, или термопарой. Явление Пельтье, открытое им в 1834 г., представляет собой обратный эффект. При прохождении тока в цепи, состоящей из различных проводников, в местах контактов выделяется или поглощается

(в зависимости от направления тока) некоторое количество тепла (Пельтье $Q_п$), пропорциональное прошедшему через контакт количеству электричества Idt и некоторому коэффициенту П, названному коэффициентом Пельтье:

$$dQ_п = \Pi_{1,2} Idt, \tag{2}$$

где I — сила тока; t — время.

В 1856 г. Томсон, применив к термоэлектрическим явлениям первое и второе начала термодинамики, вывел соотношение коэффициентов термоэдс и Пельтье

$$\Pi_{1,2} = \alpha_{1,2} T \tag{3}$$

и предсказал существование третьего явления, названного в дальнейшем эффектом Томсона. Явление Томсона, установленное экспериментально Леру в 1867 г., заключается в том, что если вдоль проводника (i) существует перепад температур ΔT, то в его объеме в дополнение к теплоте Джоуля выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) некоторое количество тепла $Q_т$ (теплота Томсона), пропорциональное силе тока, времени, перепаду температур (ΔT) и коэффициенту Томсона (τ):

$$dQ_т = \tau \Delta T I t. \tag{4}$$

Томсон также вывел соотношение между α и τ:

$$\tau_i = T \frac{d\alpha_i}{dT}, \tag{5}$$

где α_i — так называемая абсолютная (или парциальная) термоэдс, причем

$$\alpha_{1,2} = \alpha_1 - \alpha_2 \tag{6}$$

Явление термоэдс почти с момента своего открытия использовалось для измерения температур, а в дальнейшем во многих измерениях, которые могли быть сведены к измерению температур: калориметрии, электроизмерениях, актинометрии, для измерения влажности, скорости жидкостей и газов и др.

Явление Пельтье до середины нашего века использовалось лишь в демонстрационных опытах; эффект Томсона до самого последнего времени упоминался лишь на страницах физических учебников.

Первая теория термоэлектрогенераторов (ТЭГ), т. е. устройств, предназначенных для использования явления термоэдс для превращения тепловой энергии в электрическую, принадлежит Рэлею (1885 г.). В конце прошлого и в начале нашего века был создан ряд термоэлектрогенераторов, однако они не выдержали конкуренции с электрохимическими и электромеханическими источниками электроэнергии и были забыты.

Окончательный удар термоэлектрическим преобразователям энергии (ТЭПЭ) нанес выдающийся немецкий ученый Альтенкирх. В период с 1909 по 1911 г. он создал термодинамические теории

ТЭПЭ и термоэлектрических холодильников (ТЭХ) и доказал, что кпд этих устройств, сделанных из металлов и сплавов, ничтожно мал. О возможности использования в этой области полупроводников до 1930 г. ни у кого не возникало мысли. До этого года кпд ТЭГ не превышал 0.5 %, а возможности охлаждения с помощью эффекта Пельтье до 1950 г. ограничивались несколькими градусами.

Первый период

В 1931 г. в журнале «Сорена» («Социалистическая реконструкция и наука») была опубликована статья А. Ф. Иоффе «Полупроводники — новый материал электротехники». Предсказав более чем за 20 лет огромное значение полупроводников для технического прогресса и проанализировав их различные конкретные применения в будущем, Абрам Федорович впервые высказал мнение, что полупроводниковые термопары могут быть эффективно использованы для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Несмотря на поток возражений, он возглавил работы в области термоэлектрической энергетики.

Разработку ТЭГ надо было начинать с поиска и исследования материалов для термоэлементов. Систематические исследования термоэдс ряда полупроводников были проведены в период с 1934 по 1938 г. Б. М. Гохбергом с сотрудниками. Среди полупроводников они исследовали ряд оксидов и сульфидов и установили закономерности изменения термоэдс с температурой для примесных полупроводников, полуметаллов и полупроводников с «перескоковым» механизмом проводимости. Однако ни один из исследованных материалов нельзя было назвать перспективным для термоэлементов — у всех было слишком велико сопротивление.

В конце 30-х годов Ю. П. Маслаковец путем введения в PbS дозированного избытка серы или свинца научился управлять типом и величиной проводимости сернистого свинца и создал ряд термоэлектрогенераторов, дававших ток в десятки ампер.

В 1938 г. учеником Я. И. Френкеля Н. Л. Писаренко была развита микроскопическая теория термоэдс в полупроводниках, получившая широкую известность во всем мире и послужившая основой для физических исследований и разработки теории термоэлектрических преобразователей. Талантливый молодой ученый, погибший во время Великой Отечественной войны, не счел свои результаты достойными опубликования, и в дальнейшем «формула Писаренко» для термоэдс переходила из поколения к поколению как устный эпос.

В современных обозначениях формула Н. Л. Писаренко для термоэдс α выглядит следующим образом:

$$\alpha = -\frac{k}{q}\left(\frac{\varepsilon_i}{kT} - \frac{\mu}{kT}\right), \qquad (7)$$

где k — постоянная Больцмана; q — заряд электрона; ε_i — средняя энергия электронов в потоке и μ — химический потенциал:

$$\mu = \frac{\ln n}{g}. \qquad (8)$$

Здесь n — число электронов проводимости; g — число состояний, на которых эти электроны размещаются; в случае параболических зон и отсутствия вырождения

$$g = \ln \frac{2\,(2\pi m k T)^{\frac{3}{2}}}{h^3},$$

где m — эффективная масса плотности состояний.

При наличии нескольких сортов носителей

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i \sigma_i}{\sum \sigma_i}, \qquad (9)$$

где α_i и σ_i — парциальные термоэдс и электропроводность:

$$\sigma_i = q u_i n_i. \qquad (10)$$

Здесь n_i и u_i — концентрация и подвижность соответствующих носителей. Если в проводимости принимают участие и дырки, то их парциальная термоэдс берется с положительным знаком. *

В 1940 г. Б. И. Давыдов и И. М. Шмушкевич опубликовали статью «Теория электронных полупроводников», которая на много лет стала настольным пособием для всех специалистов, занимающихся полупроводниками. В невырожденных полупроводниках

$$\varepsilon_i = (r+2)kT, \qquad (11)$$

где r — показатель степени, определяющий зависимость длины свободного пробега электронов (дырок) от энергии.

В 1944 г. К. С. Шифрин опубликовал статьи, посвященные теории вырожденных полупроводников и полуметаллов.

В 1948—1950 гг. А. Ф. Иоффе разработал теорию термоэлектрического преобразования энергии, ставшую фундаментом для развития этой области науки и техники [1].

В Советском Союзе всеми исследованиями материалов для термоэлементов, разработкой термоэлектрических холодильников и генераторов руководил А. Ф. Иоффе.**

---

* При наличии носителей двух знаков термоэдс, как правило, падает, а в теплопроводности появляется дополнительный член, обусловленный биполярной диффузией носителей.

** С 1954 по 1972 г. эти работы проводились в Институте полупроводников, с 1960 по 1972 г. ими руководил А. Р. Регель. С 1972 г., после слияния ФТИ АН СССР и ИПАН, эти исследования и разработки ведутся в ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР.

Согласно теории А. Ф. Иоффе, кпд идеального термоэлемента определяется выражением:

$$\eta = \frac{T_г - T_х}{T_г} \frac{\sqrt{1+T_{ср}z}-1}{\sqrt{1+T_{ср}z}+T_х/T_г}, \quad (12)$$

а холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{T_х}{T_г - T_х} \frac{\sqrt{1+T_{ср}z}-T_г/T_х}{\sqrt{1+T_{ср}z}+1}, \quad (13)$$

где $T_х$ и $T_г$ — соответственно, температура холодных и горячих спаев; z — параметр, характеризующий эффективность материалов ветвей термоэлемента и названный в честь Абрама Федоровича Иоффе параметром Иоффе:

$$z = \frac{\alpha^2\sigma}{\varkappa}. \quad (14)$$

Здесь α, σ и $\varkappa$ — средние коэффициенты, соответственно, термоэдс, удельной электро- и теплопроводности материалов ветвей.

В металлах при обычных условиях z незначительно из-за малости термоэдс, в диэлектриках — из-за малости электропроводности. В полупроводниках при определенной концентрации (n) носителей тока z достигает своего максимального значения $z_{макс}$, которое зависит от ряда параметров материала: подвижности u носителей тока (чем больше u, тем больше электропроводность, а следовательно, и отдаваемая термоэлементом мощность) и теплопроводности $\varkappa_р$ кристаллической решетки (чем меньше $\varkappa_р$, тем меньше количество тепла, проходящее через термоэлемент, и тем выше кпд).

Более сложный характер носит зависимость z от ряда микроскопических параметров вещества: эффективной массы и механизма рассеяния электронов и дырок, ширины запрещенной зоны, числа и взаимного расположения экстремумов в валентной зоне и в зоне проводимости.

Как следует из (7), все термоэлектрические явления возникают как следствие того, что средняя энергия электронов в потоке ε_i отличается от энергии на уровне Ферми μ, причем чем больше $\varepsilon_i - \mu$, тем больше (по абсолютной величине) термоэдс и коэффициент Пельтье:

$$\prod = \frac{kT}{q}x; \quad \alpha = \frac{k}{q}x, \quad \text{где} \quad x = \frac{\varepsilon_i - \mu}{kT}. \quad (15)$$

С другой стороны, концентрация носителей, участвующих в токе, падает с ростом x, поэтому при определенном значении x величина $\alpha^2\sigma$ достигает максимума.

Рассмотрим простой случай невырожденного электронного газа и предположим, что u и $\varkappa_р$ не зависят от n, тогда

$$n = ge^{-x} \quad \text{и} \quad \sigma = quge^{-x},$$

где g — число электронных состояний в интервале энергий kT вблизи уровня ε_i, и

$$z = \frac{k^2}{q}\frac{gu}{\varkappa_р}xe^{-x}. \quad (16)$$

При выводе этого выражения для простоты мы пренебрегли электронной теплопроводностью. Продифференцировав z по x, нетрудно найти оптимальное значение x_0 и максимальное $z_{макс}$:

$$x_0 = 2 \quad \text{и} \quad z_{макс} = \frac{4k^2e^{-2}}{\varkappa_р q}. \quad (17)$$

При дополнительных предположениях и учете (8), представленные выше выражения могут быть приведены к виду, обычно используемому в литературе:

$$n_0 = \frac{2(2\pi mkT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}e^{\prime}N, \quad (18)$$

$$z_{макс} \cong \frac{4k^2}{\varkappa}\frac{un_0}{q}, \quad (19)$$

где m — эффективная масса носителей в одном экстремуме; N — число эквивалентных экстремумов (в валентной зоне или зоне проводимости).

Выражения (17), (18) и (19) отличаются не только по форме. Из (17), в частности, следует, что оптимизация взаимного расположения уровня химического потенциала и уровня проводимости может быть достигнута не только (как обычно) легированием полупроводника, а, например, за счет создания соответствующих барьеров в глубоколегированном полупроводнике, полуметалле или металле. При этом плотность состояний (g), а следовательно, и z может быть значительно больше, чем в классическом случае.

Сказанное выше позволяет подытожить требования к материалам для термоэлементов, которые должны обладать: 1) большой подвижностью u носителей тока, 2) низкой теплопроводностью $\varkappa$, 3) большой плотностью электронных состояний g, 4) оптимальной концентрацией носителей, т. е. определенным взаимным расположением уровня проводимости и уровня химического потенциала. К этому надо добавить ряд конструктивно-технологических требований, к которым относятся: 5) механическая прочность, 6) химическая устойчивость, 7) совместимость с другими элементами конструкции, 8) жаропрочность, если речь идет о материалах для высокотемпературных термоэлектрогенераторов.

Конечно, в природе не существует готовых материалов, обладающих всеми перечисленными свойствами. Разработка термоэлектрических материалов (ТЭМ) обычно проводится в несколько этапов: оптимальный выбор матрицы, последующее сложное легирование и оптимизация технологии.

3 Заказ 1006

В 1952—1953 гг. Ю. П. Маслаковцем с соавторами были опубликованы результаты исследования ZnSb и халькогенидов свинца. В этих статьях было показано, что сложным легированием можно оптимизировать в полупроводниках как концентрацию носителей, так и подвижность, и что температурная зависимость подвижности в халькогенидах свинца не подчиняется закономерностям, считавшимся до этого универсальными. Впоследствии эти аномалии были объяснены непараболичностью зон. В период с 1950 по 1960 г. физическими исследованиями, разработкой материалов термоэлементов, разработкой технологии и конструкции термоэлектрических устройств занимался под руководством А. Ф. Иоффе большой коллектив сотрудников ФТИ.

Второй период

Невосполнимой потерей для всей советской науки была кончина А. Ф. Иоффе (14 октября 1960 г.). Конечно, она нанесла тяжелый удар и по работам в области термоэлектрической энергетики. Но ничто не могло уже остановить дальнейшее развитие этих работ. Постоянно росла потребность в автономных источниках энергии, термоэлектрических холодильниках. В разработку термоэлектрических устройств включались все новые коллективы, все новые кадры. В ходе этой работы был исследован широкий круг материалов, перспективных в отношении термоэлектрического преобразования энергии: халькогениды свинца, олова, германия, сурьмы и висмута, меди; Ge и Si и твердые растворы на их основе, Te, бор и бориды, силициды переходных металлов, соединения типа $A^{II}B^{IV}$ и многокомпонентные материалы на основе всех перечисленных выше соединений.

В результате этих исследований были разработаны материалы, обеспечивающие кпд 12 % в температурном интервале — 50—250 °С, 18 % — в интервале 200—1000 °С и 8 % — в интервале температур 1000—1800 °С. Предельный кпд каскадного термоэлектрического преобразователя, охватывающий интервал температур —500—2000 °С, в настоящее время может превысить 30 %, однако реальные цифры значительно ниже.

Как уже упоминалось, эффективность ТЭМ определяется рядом параметров: эффективной массой носителей, числом и расположением экстремумов,* т. е. энергетическим спектром электронов, подвижностью и механизмом рассеяния носителей, полной теплопроводностью, концентрацией носителей. К каждому из этих параметров предъявляются определенные требования: концентрация носителей должна быть оптимальной, соответствующей выражению (18), теплопроводность — минимальной, произведение эффективной массы плотности состояний на подвижность — максимальным. Поскольку перечисленные требования противоречивы, обеспечение одновременного их выполнения на одном и том же

* Ширина зоны и расположение экстремумов должны обеспечить отсутствие биполярной диффузии.

материале оказывается очень сложной задачей. Подвижность, как правило, падает с ростом эффективной массы и концентрации носителей; теплопроводность обычно мала в кристаллах, состоящих из тяжелых и слабо связанных атомов, но в таких кристаллах обычно мала и подвижность.

Однако положение не так безнадежно, как, казалось бы, следует из сказанного выше. Исследования, проведенные за последние 30 лет, показали, что можно достичь довольно высоких значений z, удачно выбрав матрицу и обеспечив высокую эффективность материала сложным легированием (разорвав, таким образом, связи между перечисленными выше свойствами). При этом обычно каждая составляющая многокомпонентной системы обеспечивает выполнение одного из требований, перечисленных выше.

Физические свойства термоэлектрических материалов

Разработка материалов для термоэлементов проводилась в тесной связи с исследованием физических закономерностей, определяющих эффективность термоэлектрического преобразования энергии: механизмов рассеяния электронов и фононов, энергетических спектров электронов и закономерностей легирования ТЭМ. Для понимания перечисленных выше явлений изучались явления переноса, оптические свойства, все виды структуры, эффект Мессбауэра и др.

1. Подвижность, эффективная масса и механизм рассеяния носителей

Температурные и концентрационные зависимости подвижностей изучались в Ge, Si, халькогенидах свинца, висмута, сурьмы и многокомпонентных системах на основе этих материалов. Было установлено, что в халькогенидах свинца при рассеянии носителей на тепловых колебаниях решетки температурные зависимости подвижности не подчиняются экспоненциальному закону и не описываются зависимостью $u \sim T^{-3/2}$, как это считалось ранее, а имеют вид (для невырожденных носителей) $u \sim T^{-n}$, где $n = 2.5$—3. В дальнейшем эта зависимость была объяснена непараболичностью спектра носителей и детально исследованы дисперсионные зависимости для халькогенидов свинца.

Установлено, что в халькогенидах свинца и висмута и в глубоко легированном германии при рассеянии на ионах зависимость подвижности от температуры не подчиняется закону $u \sim T^{-3/2}$, а аналогична температурной зависимости подвижности при рассеянии на нейтральных примесях. Эта закономерность была объяснена экранировкой ионов свободными носителями и за счет поляризации кристаллической решетки. В этих же работах исследована зависимость подвижности от концентрации электронов и ионов. Установлено, что электроны и дырки рассеиваются по-разному дефектами, локализованными в различных подрешетках бинарных соединений.

В результате комплексного исследования высшего силицида марганца (ВСМ) установлена анизотропия термоэдс этого соединения в широком интервале температур, что позволило радикально упростить конструкцию и увеличить надежность ТЭГ. Выявлены и закономерности образования солитонов и солитонных структур этого соединения, установлены основные закономерности поведения термоэдс переходных, редкоземельных металлов и непрерывных твердых растворов металлов при высоких температурах.

В области исследования термоэлектрических свойств металлов и металлических сплавов ФТИ занимает ведущее место в мире.

Цикл исследований электропроводности, термоэдс, гальваномагнитных явлений и теплопроводности были проведены в условиях гидростатического и одноосного сжатия. Исследовался переход в металлическое состояние: на некоторых материалах получено повышение эффективности в 2—3 раза.

Изучались твердые растворы на основе халькогенидов свинца и олова, в частности с инверсией зон, при этом установлены закономерности поведения термоэлектрических, оптических свойств и теплопроводности. Получены материалы с постоянной термоэдс и эффективностью в широком интервале температур и с рекордной эффективностью в интервале температур 600—800 °С.

Исследовано влияние межэлектронного взаимодействия и рассеяния на оптических колебаниях на подвижность электронов и электронную теплопроводность халькогенидов свинца. Установлено и исследовано влияние неупругости столкновений электронов на все кинетические коэффициенты. Методом осцилляций Шубникова—де-Гааза исследовался энергетический спектр дырок в теллуриде висмута. Было установлено, что он не описывается моделью Драбла и Вольфа, а представляет собой шесть эллипсоидов, соединенных перемычками.

Твердые растворы на основе халькогенидов свинца, германия, сурьмы и висмута изучались в ряде работ, в которых были исследованы концентрационные и температурные зависимости подвижности, обнаружено и изучено межзонное рассеяние носителей, приводящее к аномалиям в поведении термоэдс вплоть до перемены ее знака.

В боре, боридах и других материалах с большим числом атомов в элементарной ячейке установлено, что температурные зависимости подвижности носителей и теплопроводности имеют промежуточный характер между аморфными и кристаллическими проводниками.

Исследован широкий круг халькогенидов свинца и твердых растворов на их основе, легированных элементами третьей группы (In, Ga, Tl). Установлено, что эти элементы могут находиться в двух разнозарядовых состояниях, причем положение соответствующих уровней зависит от элемента, состава матрицы и температуры. В определенных условиях эти уровни образуют квазилокальные, резонансные состояния на фоне валентной или запрещенной зон. Исследования халькогенидов свинца, легированных элементами третьей группы, привели к выявлению целого ряда новых явлений: сверхпроводимости в PbTe, легированном Tl, долговременной релаксации проводимости при низких температурах, стабилизации уровня Ферми.

Установлено наличие двух зарядовых состояний олова и германия в твердых растворах на основе халькогенидов свинца и, таким образом, показана возможность легирования полупроводников путем изоэлектронного замещения. Исследованы также зависимости положения соответствующих уровней от состава матрицы и температуры. С помощью эффекта Мессбауэра впервые наблюдался двухэлектронный обмен между состояниями Sn^{+2} и Sn^{+4} в твердом растворе $Pb_{1-x}Sn_xSe$. В халькогенидах свинца и твердых растворах на их основе методами Оже-спектроскопии наблюдалось обогащение поверхностного слоя халькогенидов свинца теллуром и PbSnTe — оловом. Разработанная методика позволила наблюдать изменение состава поверхностных слоев в процессе роста пленок и регулировать давление газа транспортера, состав слоя, а также определять валентность атомов по положениям и форме пиков.

2. Теплопроводность

Основополагающие работы в области теории теплопроводности твердых тел принадлежат Дебаю, Пайерлсу, И. Я. Померанчуку и ряду других выдающихся ученых. Вместе с тем экспериментальным исследованиям $\varkappa$ уделялось незаслуженно мало внимания. На это обратил внимание А. Ф. Иоффе и начиная с 1948 г. возглавил исследования механизмов теплопереноса в полупроводниках. Эти работы внесли существенный вклад в понимание одной из интереснейших областей физики твердого тела.

Как известно, $\varkappa$ слагается из следующих основных компонентов: $\varkappa_р$ — теплопроводности кристаллической решетки, $\varkappa_э$ — электронной теплопроводности, $\varkappa_{бп}$ — теплопроводности за счет биполярной диффузии электронов и дырок, $\varkappa_и$ — излучательной теплопроводности, $\varkappa_{экс}$ — экситонной теплопроводности. Теоретическое выражение для экситонной теплопроводности было получено Г. Е. Пикусом. Экспериментально $\varkappa_{экс}$ до сих пор не обнаружена.

Под руководством А. Ф. Иоффе было предпринято широкое экспериментальное исследование $\varkappa_р$, в результате которого удалось установить зависимость $\varkappa_р$ от массы атомов, от характера связей, от симметрии и размеров элементарной ячейки; кроме того, было проанализировано участие различных групп фононов в переносе тепла и показано, что в ряде случаев коротковолновые фононы и оптическая ветвь колебаний вносят существенный вклад в величину $\varkappa_р$; показано также, что вклад коротковолновых фононов в $\varkappa_р$ может быть как положительным, так и отрицательным.

Исследовалось рассеяние фононов на нейтральных примесях, ионах и электронах, проанализировано рассеяние различных групп фононов на фононах всех видов дефектов и электронах. Установлено, что температурная зависимость теплопроводности кристаллической решетки при рассеянии фононов на фононах при высоких температурах во многих случаях не подчиняется закону Дебая—Пайерлса: $\varkappa_p \sim T^{-1}$, а имеет более общий вид: $\varkappa \sim T^{-N}$, где $0 \leqslant N < 2$, и зависит от характера связей, структуры и размера элементарной ячейки и температуры.

На ряде материалов исследована электронная теплопроводность: зависимость числа Лоренца от вырождения электронного газа, влияния неупругих соударений, биполярной диффузии электронов и дырок.

Добавочное тепловое сопротивление кристаллической решетки многокомпонентных (если в замещении участвуют атомы двух и более сортов) твердых растворов на основе теллурида висмута в области малых концентраций аддитивно складывается из тепловых сопротивлений твердых растворов, в которых осуществляется замещение атомами только одного сорта. Так, например, добавочное тепловое сопротивление ΔR_x, возникающее при введении в Bi_2Te_3 небольшого количества чужеродных атомов, пропорционально их числу. При дальнейшем увеличении концентрации примесей аддитивность нарушается, что может быть связано с пересечением искаженных областей вокруг примесных атомов, а также уменьшением переноса тепла группой фононов, рассеиваемой примесными атомами.

Исследования зависимости теплопроводности кристаллической решетки от состава твердых растворов Bi_2Te_3—Bi_2Se_3 и других материалов, легированных электроактивными примесями, показали, что при комнатной температуре необходимо учитывать как влияние биполярной диффузии, так и рассеяние фононов на заряженных примесях. Так, например, было показано, что в системе $Bi_2Te_{1-x}Se_x$ $(0<x<1)$ наблюдается резкое снижение теплопроводности кристаллической решетки при введении в Bi_2Te_3 сравнительно небольших количеств Bi_2Se_3 (до 4 % мол.). При дальнейшем увеличении концентрации Bi_2Se_3 (от 4 до 20 %) величина $\varkappa_p$ практически остается постоянной и лишь в области 30 % Bi_2Se_3 наблюдается ее рост, который обусловлен существованием соединения Bi_2Te_2Se.

Резкое уменьшение $\varkappa_p$ уже при малых концентрациях второго компонента является характерным для всех твердых растворов на основе теллурида висмута, кроме системы Bi_2Te_3—Sb_2Te_3, где зависимость $\varkappa_p$ от состава твердого раствора имеет размытый минимум в области 50—80 % мол. Sb_2Te_3. В связи с этим можно предположить, что малые изменения $\varkappa_p$ в этом твердом растворе обусловлены лишь рассеянием на флуктуациях масс атомов, участвующих в замещении (Sb→Bi); в остальных твердых растворах существенный вклад вносит также рассеяние на флуктуациях упругих сил и объема.

Зависимость подвижности электронов u_n от состава твердых растворов на основе Bi_2Te_3 характеризуется резкими изменениями у края системы. Так, например, при введении всего лишь 10 % мол. Bi_2Se_3 величина u_n уменьшается более чем в 2 раза, при введении 10 % мол. Sb_2S_3 — почти в 4 раза. Оценки отношения $u_n/\varkappa_p$ показали, что в твердых растворах халькогенидов висмута и сурьмы эта величина уменьшается с увеличением концентрации второго компонента, однако изменение величины $\alpha^2\sigma$ оказывается существенно меньшим за счет увеличения m. Совместные изменения $\alpha^2\sigma$ и $\varkappa_p$ приводят к увеличению термоэлектрической эффективности. Таким образом, в тех случаях, когда при образовании твердых растворов значительно изменяются эффективная масса плотности состояний и ширина запрещенной зоны, т. е. изменяется энергетический спектр носителей заряда, уже нельзя рассматривать поведение подвижности в качестве единственного критерия, характеризующего эффективность материала. Необходимо учитывать взаимосвязанные изменения u и m, отражающие изменение как процессов рассеяния, так и энергетического спектра носителей тока. При таком подходе идея А. Ф. Иоффе о благоприятном изменении соотношения процессов рассеяния носителей заряда и фононов в твердых растворах находит еще одно подтверждение в твердых растворах на основе халькогенидов висмута и сурьмы.

Интересные особенности соотношения рассеяния носителей заряда и фононов были установлены в пленках твердых растворов халькогенидов висмута и сурьмы. При комнатной температуре и ниже существенное влияние на перенос тепла и заряда в этих пленках оказывают процессы, происходящие на межкристаллитных границах, которые в различной степени рассеивают электроны и фононы. При определенных толщинах пленок и средних размерах кристаллитов в пленках твердого раствора $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ достигается увеличение эффективности на 30 % и более по сравнению с объемными материалами. Из анализа данных по влиянию размерных эффектов на решеточную теплопроводность пленок следует, что перенос тепла в этих материалах при температурах ниже комнатной осуществляется в основном длинноволновыми фононами.

Исследование тепловых и электрофизических свойств пленок теллурида свинца и твердых растворов на его основе показало, что размерный эффект проявляется в основном в электронной части теплопроводности, решеточная теплопроводность в пленках с размерами кристаллов более 1000 Å при T = 50 K соответствует данным для монокристаллов PbTe. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что большой вклад в теплоперенос в теллуриде свинца вносят коротковолновые фононы. Этот вывод подтвердился исследованиями $\varkappa_p$ монокристаллов.

В 1956 г. в ФТИ начались исследования электрических и тепловых свойств силицидов (главным образом переходных металлов). Силициды привлекли внимание своим благоприятным комплексом физико-химических свойств — механической прочностью,

стойкостью к воздействию агрессивных сред, жаропрочностью и т. д. Кроме того, они дешевы, не содержат дефицитных и токсичных компонентов. Поисковые работы показали, что наиболее перспективными для термоэлектрического применения являются моносилициды и высшие силициды переходных металлов группы железа и силицид магния.

Результаты этих работ заинтересовали ряд советских и зарубежных ученых и способствовали развитию исследований, связанных с изучением этих соединений. В ФТИ в основном проводились работы по исследованию высшего силицида марганца, моносилицида кобальта и дисилицида магния.

Исследование силицида магния и его твердых растворов с германидом и станнидом магния позволило уточнить вид зонной структуры этих соединений, детально изучить вклады различных процессов в теплопроводность и получить недефицитный дешевый материал с довольно высокой термоэлектрической эффективностью.

При исследовании моносилицида кобальта впервые было применено комплексное исследование кинетических и оптических свойств одного материала, что позволило расшифровать ряд деталей зонной структуры этого соединения. Были разработаны новые методики исследования оптических свойств непрозрачных веществ, какими являются большинство термоэлектрических материалов.

Наибольшее число новых, оригинальных результатов было получено при исследовании высшего силицида марганца (ВСМ). В области гологенности этого соединения $MnSi_{1.71+1.75}$ наблюдается ряд кристаллических структур, каждая из которых может быть описана с одних позиций. Кристаллическую решетку ВСМ можно рассматривать как состоящую из двух подрешеток: «жесткой» подрешетки марганца и «мягкой» подрешетки кремния.

Атомы ВСМ взаимодействуют таким образом, что при изменении внешних условий (давления, температуры) период вдоль тетрагональной оси изменяется только у «мягкой» подрешетки, а у «жесткой» он практически не меняется. Взаимное изменение концентрации атомов марганца и кремния приводит к образованию солитонов — узких полосок, расположенных перпендикулярно тетрагональной оси и отличающихся по составу от основной фазы. Такая полосчатая структура наблюдается на всех монокристаллах ВСМ. Солитонная структура может приводить к улучшению свойств ВСМ как термоэлектрического материала — представление о ней объясняет сильную анизотропию его электрических м тепловых свойств.

Большой интерес представляет анизотропия термоэдс ВСМ, которая имеет место во всех структурах и в широком интервале температур, причем разность между термоэдс, измеренными вдоль и поперек тетрагональной оси, мало меняется с температурой и составляет 100 мкВ/К. Изучение оптических свойств ВСМ впервые непосредственно показало, что оптические фононы вносят заметный вклад в теплопроводность кристаллической решетки.

В ФТИ была исследована термоэдс практически всех переходных и редкоземельных металлов, а также почти всех непрерывных растворов металлов в широком интервале температур (от 80 до 2000 К). Такие полные и систематические данные о термоэдс металлов получены впервые. Их анализ привел к выявлению новых эмпирических закономерностей. Наиболее важным было установление близкого подобия температурных зависимостей термоэдс металлов, принадлежащих к одной группе периодической системы элементов, а также сложности поведения термоэдс большинства металлов при высоких температурах, выражающейся в наличии экстремумов ее величины и изменении ее знака.

Важные в научном и практическом отношениях закономерности были установлены при исследовании свойств металлов при плавлении.

Методики и технология

В области термоэлектрического преобразования энергии, как и во всех областях науки и техники, получение существенно новых физических результатов и разработка новых приборов были неразрывно связаны с совершенствованием технологических процессов и разработкой новых измерительных методик.

В течение прошедших лет были разработаны методы получения многокомпонентных ТЭМ с помощью порошковой металлургии, экструзии, зонного выравнивания, методами Бриджмена и Чохральского. Были разработаны методы получения пленок с помощью катодного распыления, газотранспортных реакций и практически всеми вариантами термического испарения. При этом особое внимание уделялось получению образцов сложных композиций как постоянного (заданного) состава, так и состава, меняющегося по определенному закону. Часть технологических операций была автоматизирована. Кроме того, разработаны методики, обеспечивающие возможность измерения целого ряда характеристик пленок (термоэдс, электропроводности, постоянной Холла, теплопроводности, Оже-спектров), в частности, в процессе их роста, термообработки и окисления. Пленки ряда материалов были получены в виде монокристаллических образцов, блочных структур с широко меняющимися размерами блоков и в аморфном состоянии. Значительное число работ было посвящено коммутации термоэлементов. Однако, несмотря на ряд серьезных успехов в области развития технологии термоэлектрических преобразователей, необходимо подчеркнуть, что уровень ее еще не соответствует современным требованиям и в значительной степени задерживает процесс совершенствования термоэлектрических устройств, повышения их эффективности, стабильности, срока службы быстродействия, надежности, микроминиатюризации и т. д. Боль-

шинство направлений оптимизации термоэлектрических преобразователей тормозится именно уровнем технологии, а не отсутствием идей.

В области разработки измерительных методик, которым А. Ф. Иоффе уделял особое внимание, также имелся ряд достижений. Были разработаны нестационарные методы измерения при комнатной температуре и в широком интервале температур. Очень большое распространение получил абсолютный метод, относительные методы и методы измерения теплопроводности при высоких температурах по распределению температур вдоль «гантели».

До настоящего времени основным остается стационарный метод, и измерение теплопроводности одного образца занимает от одного до нескольких дней, что в значительной степени задерживает темп физического исследования и разработку материалов.

Значительное внимание уделялось также измерению электропроводности гальваномагнитных коэффициентов. Был разработан ряд методик измерений на переменном токе, в том числе бесконтактные (по закручиванию образца, подвешенного на упругой нити в вращающемся магнитном поле, по потерям), на биениях частот, а также метод амплитудной модуляции в сильных, квантующих и импульсных магнитных полях.

Разработан ряд методов измерения термоэдс и термомагнитных явлений, методов исследования явлений переноса в условиях гидростатического сжатия и одноосной деформации, методов разделения адиабатических и изотермических явлений переноса.

Значительное внимание уделялось исследованию оптических и фотоэлектрических свойств ТЭМ, что часто требовало совершенствования старых и разработки новых методик измерения в связи с особенностями некоторых термоэлектрических материалов (отсутствием окна прозрачности, хрупкостью, слоистостью, структурной неоднородностью и др.). За последние годы большинство измерений явлений переноса было автоматизировано на основе применения ЭВМ.

Очень важная информация о различном зарядовом состоянии ионов и механизмах перезарядки была получена методами исследования эффекта Мессбауэра и Оже-спектроскопии.

Постоянное внимание уделялось исследованию структуры материалов и фазового состава ТЭМ с помощью рентгеноструктурного, микрорентгеноструктурного, металлографического и термографического анализов.

Термоэлектрические устройства

Вышеизложенное показывает, насколько сложны и противоречивы требования к материалам для термоэлементов. Для получения эффективного термоэлемента необходимо разорвать целый ряд прочных связей (например, между теплопроводностью и электропроводностью) и совместить трудно совместимые условия. Необходимо было найти сложные композиции, чтобы удовлетворить всем требованиям. Именно поэтому потребовалось несколько десятилетий совместных усилий физиков и металлургов, химиков и технологов для реализации теоретических прогнозов А. Ф. Иоффе.

Как уже упоминалось, в настоящее время разработана целая серия высокоэффективных материалов, которые позволяют перекрыть очень широкий интервал температур от 200 до 1600 °С и обеспечить кпд преобразования идеального каскадного термоэлемента свыше 30 %.

Следует, однако, учитывать, что кпд ТЭГ значительно отстает от указанных выше цифр кпд материалов. Объясняется это целым рядом причин: ограниченным интервалом температур работы ТЭГ, неизбежными электрическими и тепловыми потерями в их конструкции, несовершенством конструктивных материалов (электро- и теплоизоляционных, коммутационных, антисублимационных, антидиффузионных и антикоррозийных прослоек) и др. В некоторых случаях потери снижают кпд генератора более чем в четыре раза.

В настоящее время ТЭГ применяются там, где использование традиционных источников тока невозможно или неэкономично. В первую очередь — это снабжение электроэнергией удаленных и труднодоступных объектов.

Наряду с существенным недостатком — низким кпд, у ТЭГ есть ряд неоспоримых преимуществ. Прежде всего это возможность создания ТЭГ на очень широкий интервал энергий (от микроватт до сотен киловатт), возможность работать в любом интервале температур и на любом топливе, автономность, т. е. отсутствие необходимости обслуживаний, большой срок службы (до 10^5 час.), устойчивость по отношению к вибрациям и другим перегрузкам.

Важная задача ТЭГ — разработка пассивных конструктивных материалов, которые, хотя непосредственно и не вырабатывают электроэнергии, тем не менее играют весьма существенную роль в работе ТЭГ. Эти материалы должны обладать довольно сложным комплексом свойств. Так, например, прослойки, отделяющие термобатарею от нагревателя и холодильника, должны быть хорошими изоляторами, и в то же время они должны иметь по возможности большую теплопроводность. Не менее сложную задачу представляет разработка так называемых коммутационных материалов, из которых делаются перемычки между ветвями термоэлементов и технологии коммутации. Наконец, завершающим этапом должно являться создание конструкции генератора и разработка технологии его сборки в целом.

В настоящее время уже разработан целый ряд типов ТЭГ. Термоэлектрогенераторы, работающие на органическом топливе (жидком и природном газе), находят широкое применение, в первую очередь для обслуживания газо- и нефтепроводов. Применение ТЭГ для питания радиорелейных станций и контрольных пунктов телемеханики, расположенных вдоль газопроводов, позволяет отказаться от обслуживающего персонала, перевести

станции на автоматическую работу. Применение ТЭГ для питания станций катодной защиты в ряде случаев увеличивает срок службы газопровода, подлежащего защите, в 6—8 раз (2 года без защиты, 25 — с защитой), а это дает исключительно большую экономию капитальных затрат.

Термогенераторы, работающие на изотопном и реакторном топливе, широко применяются для питания космических аппаратов, маяков и буев, автоматических метеостанций, высокогорных и полярных станций различного назначения. ИзоТЭГ начали применяться также в кардиостимуляторах.

Первый в мире термоэлектрический холодильник был создан в ФТИ в 1950 г. после того, как А. Ф. Иоффе создал теорию термоэлектрического охлаждения. В период с 1950 по 1956 г. были разработаны охлаждающие устройства для различных целей: бытовые холодильники, микрохолодильники, конденсационные гигрометры, охладители для радиоэлектронной аппаратуры, каскадные холодильники, охладители для фотосопротивлений.

Теория А. Ф. Иоффе была дополнена учетом теплоты Томсона, температурных зависимостей всех параметров термоэлементов, учетом влияния отступлений от оптимальных условий. Было показано, что в нестационарном режиме можно достичь более глубокого охлаждения, а при специальном выборе формы импульса тока теоретически можно достичь абсолютного нуля. Разработан ряд ТЭХ для самых различных целей, в том числе охладители для медицинских целей, вымораживания паров воды и масла, ТЭХ большого объема, термостаты различного назначения.

В настоящее время уже разработаны ТМ, обеспечивающие охлаждение более чем на 200 °С (от комнатной температуры). Это открыло возможность создания целого ряда приборов, многие из которых просто не могли быть созданы иными путями. Объясняется это тем, что у ТЭХ, как и у ТЭГ, имеется целый ряд особенностей, отличающих их от «классических» установок: практически безграничный срок службы, простота обслуживания, удобство стабилизации и тонкого регулирования температуры, возможность создания приборов на сколь угодно малые и большие мощности, устойчивость по отношению к вибрациям и ускорениям, отсутствие каких-либо агрессивных жидкостей и независимость работы от ориентации в пространстве.

Наличие необходимых материалов и перечисленные выше особенности ТЭХ позволили в настоящее время создать очень большое число приборов, которые даже невозможно перечислить в короткой статье. Эти приборы можно разделить на следующие группы: 1) приборы для охлаждения и термостатирования радиоэлектронной, фотоэлектронной и оптической аппаратуры; 2) приборы для медицинских целей (для локального охлаждения или замораживания тканей при физиотерапевтических и хирургических методах лечения и др.); 3) холодильники для вымораживания паров воды и масла; 4) холодильники и термостаты для исследовательских и лабораторных целей, в частности для космической биологии; 5) кондиционеры воздуха и охладители воздуха для всех видов транспорта, рабочих и жилых помещений; 6) бытовые холодильники и охладители продуктов.

В настоящее время ТЭПЭ уже прочно завоевали свое место в малой энергетике. Повышение эффективности ТЭПЭ в 1.5—2 раза может привести к радикальному расширению их области применения. Не менее важной задачей является уменьшение установочной стоимости и увеличение их срока службы.

Большие перспективы открывает совмещение ТЭПЭ с другими преобразователями энергии. Так, установки, совмещающие ТЭГ с фотоэлементами и ТЭГ с термоэмиссионными преобразователями, могут обеспечить в будущем кпд, приближающийся к 40 %.

Новые направления

За последнее время нашел широкое применение ряд приборов, основанных на применении термоэлектрических явлений, в частности приборы, основанные на использовании эффекта Пельтье для управления фазовым переходом. На этом принципе были созданы устройства для приема, хранения и обработки информации: усилители, выпрямители, элементы памяти, генераторы, преобразователи электрического сигнала в оптический и для решения обратной задачи. По сравнению с аналогами, известными ранее, эти приборы обладают рядом преимуществ: большим (более 1000) коэффициентом усиления, возможностью выпрямлять малые сигналы (вплоть до уровня шумов), работать в экстремальных условиях и др.

Наряду с уже ставшими традиционными методами легирования, перечисленными выше, за последние годы были открыты и исследованы новые, основанные на том, что ряд элементов III и IV групп периодической системы Менделеева проявляет в халькогенидах элементов IV группы переменную валентность. Это открыло новые возможности для решения прикладных задач (в частности, для стабилизации уровня Ферми) и послужило началом для исследования целого ряда новых явлений (долговременной релаксации проводимости, сверхпроводимости и др.). До настоящего времени нет общепризнанного объяснения широкого круга эффектов, открытых в этих системах, хотя число работ, посвященных их исследованиям, уже исчисляется не одним десятком.

Дальнейшие перспективы расширения областей применения ТЭГ и решаемых ими задач в значительной степени зависят от повышения эффективности материалов для термоэлементов.

За прошедшие 50 лет был очерчен круг соединений, оптимальных в качестве основы для термоэлектрического материала. Это в основном халькогениды элементов IV и V групп таблицы Менделеева, меди и переходных металлов, силициды переходных металлов, германиды и станиды кремния. Несколько особняком

стоят германий и кремний, обладающие благоприятным значением произведения $\alpha^2\sigma$, входящего в выражение для параметра Иоффе z. В то же время они имеют высокую теплопроводность, однако в легированных твердых растворах Ge—Si ее удается понизить в десятки раз. Весьма высокими параметрами при низких температурах обладают сплавы висмута и сурьмы.

Для повышения термоэлектрической эффективности А. В. Иоффе и А. Ф. Иоффе был предложен метод образования твердых растворов замещения. Теплопроводность в ряде твердых растворов падает значительно сильнее, чем $\alpha^2\sigma$, за счет чего и достигается выигрыш в термоэлектрической эффективности ТЭМ. На этой основе было разработано большинство ТЭМ, применяющихся в настоящее время, и обеспечен кпд 1—3 % на 100 °С перепада температур на спаях термоэлемента.

Новые возможности повышения термоэлектрической эффективности открылись в связи с исследованием сплавов с инверсией зон. В таких сплавах по мере приближения к бесщелевому состоянию одновременно падает теплопроводность и растет подвижность, поэтому можно ожидать радикального повышения z.

Однако до настоящего времени эти возможности были реализованы лишь в ограниченной степени, по-видимому, из-за технологических трудностей.

При использовании полупроводников в электронике обычно наилучшей матрицей являются совершенные монокристаллы. В случае применения термоэлементов — это не так. Действительно, для обеспечения максимального кпд термоэлектрический материал должен по возможности беспрепятственно пропускать электрический ток и в то же время создавать максимальные затруднения для прохождения теплового потока. Все дефекты структуры, которые повышают отношение электропроводности к теплопроводности, в данном случае играют положительную роль. При этом надо иметь в виду, что почти все атомарные примеси рассеивают преимущественно коротковолновые фононы. Чтобы перекрыть путь всем фононам, следует ввести соответствующий набор дефектов. Наряду с атомарными и молекулярными примесями, сюда должны войти комплексы, дислокации, границы зерен и фаз и микроскопические полости. Следует отметить, что только три последних вида дефектов дают рассеяние фононов, не зависящее от частоты. Во всех остальных случаях длина свободного пробега для фононов (так же как и при рассеянии на акустических колебаниях) с ростом длины волны фонона стремится к бесконечности.

Вводя всевозможные дефекты, преграждающие путь всем фононам, нужно в то же время позаботиться о том, чтобы эти дефекты рассеивали лишь определенные группы электронов, обеспечив одновременно и большую подвижность и отступление средней энергии электронов от уровня Ферми. В этом отношении перспективны барьеры на границах зерен, солитонов и др.

Существует целый ряд механизмов селективного рассеяния электронов. При рассеянии на неэкранированных ионах длина

свободного пробега электрона пропорциональна квадрату энергии, и средняя энергия в потоке для невырожденного электронного газа составляет 4 кТ (вместо обычной величины 2 кТ), что, конечно, благоприятно сказывается на величине термоэдс. Однако при относительно большой концентрации носителей, оптимальной в материалах для термоэлементов, дальнодействующий потенциал ионов сильно экранируется и рассеяние перестает быть избирательным.

Селективным может быть межзонное рассеяние, особенно если «рассеивающая» зона благоприятно расположена и обладает большой плотностью состояний. Этим частично объясняется высокая термоэдс ряда переходных металлов и аномалии температурных и концентрационных зависимостей термоэдс ряда полупроводников. К сожалению, в настоящее время мы почти не умеем управлять взаимным расположением валентных зон, а следовательно, и этим механизмом рассеяния.

По-видимому, одним из наиболее перспективных селективных механизмов рассеяния является рассеяние на межзеренных границах в металлических сплавах и глубоко легированных полупроводниках. Границы зерен в гетерофазных системах также могут обеспечить сильное рассеяние фононов. Идеальной была бы «просветленная» для электронов граница, которая в то же время обеспечивала бы полное внутреннее отражение для максимального числа фононов. На границе фаз можно также ожидать эффект теплового выпрямления.

Следующая проблема — это создание напряженных состояний термоэлектрических материалов. Как показывает ряд исследований, таким способом можно в нужном направлении изменить энергетический спектр, константы электрон-фононного взаимодействия, а также теплопроводность материалов. Основная задача состоит в том, чтобы путем выбора соответствующих композиций создавать внутренне напряженные состояния, так как применение внешнего давления сопряжено с большими конструктивными трудностями.

До последнего времени наилучшими материалами для ТЭПЭ считались классические проводники с большой подвижностью носителей. Однако анализ показал, что при высоких температурах преимущества получают материалы с нестандартными механизмами проводимости, в которых подвижность носителей растет с ростом температуры, а плотность состояний и концентрация носителей, по крайней мере, на порядок выше, чем в «традиционных» полупроводниках. Изучение этого класса веществ находится сейчас на начальной стадии. Задача состоит в том, чтобы на основе комплексного исследования научиться управлять их свойствами. Большое значение должно также иметь дальнейшее развитие работ по изучению электронных и фононных спектров.

Теория показывает, что термоэдс (при заданной концентрации носителей) тем больше, чем больше эффективная масса плотности состояний. С другой стороны, подвижность обратно пропор-

циональна инерционной эффективной массе и вероятности рассеяния, которая для подавляющего большинства механизмов рассеяния пропорциональна массе плотности состояний. Следовательно, важной задачей является разрыв связи между «статической» и «кинетической» эффективными массами, входящими в термоэдс и подвижность. Для решения этой задачи необходимо увеличить число экстремумов в зоне, но при том обязательном условии, что переходы между ними должны быть исключены.

Проведенные исследования показали, что энергетический спектр наиболее эффективных термоэлектрических материалов является многоэллипсоидным. Особенно больших значений эффективность достигает в псевдобинарных твердых растворах, в которых масса плотности состояний велика потому, что зоны компонентов оказываются на одном уровне.

Это иллюстрирует температурная зависимость эффективности халькогенидов свинца и германия. Она достигает максимума при той температуре, при которой зоны легких и тяжелых дырок оказываются приблизительно на одном уровне. Напротив, в теллуриде олова и твердых растворах на его основе термоэдс, подвижность и термоэлектрическая эффективность резко падают за счет межзонных переходов. При этом эффективность соответствующих материалов уменьшается более чем в два раза. Таким образом, необходимо научиться корректировать расположение близко лежащих экстремумов и вероятность переходов между ними. Небольшой опыт в этом направлении уже имеется, но, разумеется, вся основная работа еще впереди.

Одним из неиспользованных резервов увеличения z является непараболичность зон термоэлектрических материалов. В тех же теллуридах свинца и германия масса плотности состояний при оптимальной концентрации носителей приблизительно в 10 раз больше, чем на дне зоны; это увеличение массы привело бы к огромному росту термоэлектрической эффективности, если бы одновременно не падала подвижность. Эту связь также можно разорвать, создав механизмы рассеяния, не зависящие от плотности состояний, например на границах зерен в мелкодисперсных порошках или в тонких пленках. В этом случае длина свободного пробега будет определена характерной длиной (размером зерна или толщиной пленки). Следовательно, появляется новая задача — изучение размерных эффектов.

Как уже упоминалось, другим резервом увеличения термоэдс является нарушение равновесия в потоке (и соответствующее повышение термоэлектрической эффективности) путем создания селективного рассеяния. Этот вопрос частично решен для ряда сплавов переходных металлов, но для более эффективных термоэлектрических материалов он остается открытым. В частности, производилось много опытов по увеличению средней энергии в потоке за счет рассеяния на ионах примеси, но исследования показали, что диэлектрическая постоянная в термоэлектрических материалах очень велика (более 100) и потенциал иона

в силу экранировки приближается к потенциалу нейтрального атома.

Следует отметить, что к нормализации средней энергии в потоке приводят межэлектронные столкновения, роль которых установлена на опыте. Тем не менее создание селективного рассеяния (в частности, межзонного) выгодно для повышения эффективности термоэлектрических материалов и остается нашим резервом. Особенно эффективно его можно использовать, по-видимому, в соединениях переходных и редкоземельных металлов, в этом отношении почти не исследованных.

Не меняя в значительной степени средней энергии электронов в потоке, различные примеси совершенно по-разному влияют на подвижность дырок и электронов, а некоторые (при содержании менее 1 %) вносят радикальные изменения в энергетический спектр. Это обстоятельство необходимо учитывать при легировании ТЭМ.

Остановимся еще раз на теплопроводности термоэлектрических материалов и перспективах ее дальнейшего уменьшения.

За прошедшие годы исследовались многие механизмы рассеяния фононов: на фононах; на электронах и на всех видах дефектов за счет изотопического эффекта (разности масс), разности радиусов и изменения силы связи. Перспективным для термоэлементов является изотопический эффект, так как он не влияет на подвижность носителей. Отыскание примесей, наиболее благоприятно влияющих на отношение подвижности и теплопроводности, продолжает быть одной из основных задач в области разработки материалов для термоэлементов.

Твердые растворы Ge—Si были первым объектом, для которого опытами А. Ф. Иоффе и А. В. Иоффе столь четко подтвердилась идея А. Ф. Иоффе о преимуществах твердых растворов по сравнению с чистыми веществами благодаря более эффективному рассеянию фононов (чем электронов). На этом же материале впервые обнаружен факт очень сильного влияния электроактивной примеси на теплопроводность кристаллической решетки твердых растворов. Введение 10^{20} см$^{-3}$ легирующей примеси снижает теплопроводность решетки в 1.5—2.5 раза по сравнению с теплопроводностью нелегированных образцов. При этом надо учесть, что теплопроводность нелегированных сплавов уже в 10—15 раз меньше, чем теплопроводность кремния.

Еще более поразительным является тот факт, что одна и та же концентрация легирующей примеси создает в кремнии (совершенном кристалле) дополнительное тепловое сопротивление на порядок меньше, чем в сплавах Ge—Si (разупорядоченной системе). Эти экспериментальные факты удается объяснить, если предположить, что рассеяние фононов на электроактивных примесях происходит не по рэлеевскому закону, и сечение рассеяния слабо зависит от длины волны фононов.

Дальнейшее подавление теплопереноса всеми группами фононов является одним из главных резервов повышения эффективности ТЭПЭ.

4 Заказ 1006

Для всех термоэлектрических устройств, наряду с повышением эффективности, весьма важной является задача разработки оптимальных условий для сброса тепла. Это, в частности, создает серьезные трудности для использования ТЭГ и ТЭХ в космосе. Трудности удается преодолеть, если сделать p—n-переходы в термоэлементах светящимися, т. е. создать такие условия, чтобы теплота Пельтье выделялась на холодном спае генераторов и на горячем спае холодильников в виде света.

В связи с перспективами применения многокомпонентных систем неупорядоченных полупроводников важное значение приобретают экспериментальные и теоретические исследования их механизма проводимости. Экспериментальные исследования ряда тугоплавких соединений, в которых, по-видимому, при высоких температурах осуществляется перескоковый механизм проводимости, также говорит о большой перспективности этих материалов.

1. Жидкие полупроводники

Как показали исследования ряда жидких полупроводников (твердых растворов на основе халькогенидов меди и др.), при плавлении этих веществ теплопроводность падает сильнее, чем подвижность носителей, что открывает возможность использования таких материалов для ТЭПЭ.

2. Анизотропные материалы

В работах А. Г. Самойловича и его учеников разработана теория анизотропии термоэдс и основанных на ней приборов. В дальнейшем была детально исследована естественная анизотропия CdSb, ВСМ и искусственная анизотропия твердых растворов и создан целый ряд приборов широкого профиля на основе халькогенидов висмута и сурьмы. Использование и разработка анизотропной термоэдс является одной из важных задач термоэнергетики.

Выше мы остановились лишь на разработке «активных» материалов, т. е. материалов, в которых непосредственно происходит превращение тепловой энергии в электрическую. Не меньшее значение имеет решение физических, теплотехнических, технологических и конструктивных задач, связанных с разработкой ТЭГ в целом. В ближайшие годы решение перечисленных задач должно привести к повышению эффективности ТЭПЭ (в различных интервалах температур) в 1.5—2 раза.

Разнообразные запросы предъявляет к энергетике техника будущего: полная автоматизация трудоемких производственных процессов и сельскохозяйственных работ, освоение космоса, недр земли и глубин океанов. Все это потребует огромного количества удобной и разнообразной электроэнергии. Новые источники электроэнергии должны удовлетворять целому ряду требований.

Прежде всего должна быть обеспечена автоматическая работа без ремонта и обслуживания и др. Целый ряд из этих задач может быть решен с помощью ТЭГ.

Как уже упоминалось, термоэлектрическое охлаждение — это также область техники, родиной которой является Советский Союз, а рождение ее неразрывно связано с ФТИ. Не следует, однако, думать, что, завоевав приоритет, мы тем самым обеспечили себе почетное первенство в этих областях техники на вечные времена. Много раз мы были свидетелями того, что удержать первенство оказывалось не менее трудно, чем его завоевать. Сейчас крупнейшие фирмы во всех передовых странах мира разрабатывают и выпускают ТЭГ, ТЭХ, термостаты и кондиционеры для самых различных целей, разрабатывают новые материалы и новые принципы термоэлектрического преобразования энергии. Объясняется это большим экономическим эффектом термоэлектрических устройств, а также возможностью решения с их помощью целого ряда специфических задач. Чтобы закрепить за собой ведущее место в этом соревновании, мы должны очень напряженно работать, используя при этом все преимущества социалистической системы, планирования науки.

В этой статье мы не имеем возможности перечислить даже основные результаты работ в области термоэлектрического преобразования энергии, прямо или косвенно связанных с историей ФТИ. Пробелы в какой-то мере восполнит библиография. В заключение хотелось бы отметить, что доклады А. Ф. Иоффе на многих международных конференциях и его личное общение с иностранными учеными несомненно стимулировали развитие работ в области термоэлектричества во многих странах мира. Во многих странах А. Ф. Иоффе заслуженно называют «отцом полупроводников», а его книги — «библией термоэлектричества».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иоффе А. Ф.* Энергетические основы термоэлектрических батарей из полупроводников. Л.; М.: Изд-во АН СССР, 1950.
2. *Иоффе А. Ф., Стильбанс Л. С., Иорданишвили Е. К., Ставицкая Т. С.* Термоэлектрическое охлаждение. Л.; М.: Изд-во АН СССР, 1956.
3. Полупроводники в науке и технике. Т. 1, 2 / Под ред. А. Ф. Иоффе. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1957, 1958.
4. *Воронин А. Н.* Полупроводниковые термоэлектрогенераторы. Л.: ЛДНТП, 1957.
5. *Стильбанс Л. С.* Полупроводниковые термоэлектрохолодильники. Л.: ЛДНТП, 1957.
6. *Иоффе А. Ф.* Физика полупроводников. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1957.
7. *Стильбанс Л. С.* Физика полупроводников. М.: Сов. радио, 1967.
8. *Коленко Е. А.* Термоэлектрические охлаждающие приборы. Л.: Наука, 1967.
9. *Равич Ю. И., Ефимова Б. А., Смирнов И. А.* Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца. М.: Наука, 1968.
10. *Иорданишвили Е. К.* Термоэлектрические источники питания. М.: Сов. радио, 1968.
11. *Покорный Е. Г., Шербина А. Г.* Расчет полупроводниковых охлаждающих устройств. Л.: Наука, 1969.

12. *Манасян Ю. Г.* Судовые термоэлектрические устройства и установки. Л.: Судостроение, 1968.
13. *Каганов М. А., Привин М. Р.* Термоэлектрические тепловые насосы. Л.: Энергия, 1970.
14. *Охотин А. С., Ефремов А. А., Охотин В. С., Пушкарский А. С.* Термоэлектрические генераторы. М.: Атомиздат, 1971.
15. *Гольцман Б. М., Кудинов В. А., Смирнов И. А.* Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3. М.: Наука, 1972.
16. *Оскотский В. С., Смирнов И. А.* Дефекты в кристаллах и теплопроводность. Л.: Наука, 1972.
17. *Цветков Ю. Н., Аксенов С. С., Шульман В. М.* Термоэлектрические охлаждающие устройства и установки. Л.: Судостроение, 1972.
18. *Охотин А. С., Пушкарский А. С., Боровикова Р. П., Симонов В. А.* Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. М.: Наука, 1974.
19. *Качикус Е. В.* Методы исследования эффекта Холла. М.: Сов. радио, 1974.
20. *Анатычук Л. И.* Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. Киев: Наук. думка, 1978.
21. *Котырло Г. К., Лобунец Ю. Н.* Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов: Справочник. Киев: Наук. думка, 1980.
22. *Анатычук Л. И., Лусте О. Я.* Микрокалориметрия. Львов: Вища школа, 1981.
23. *Иорданишвили Е. К., Бабин В. П.* Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии. М.: Наука, 1983.
24. *Лукишер Э. М., Вайнер А. Л., Сомкин М. Н., Водолагин В. Ю.* Термоэлектрические охладители. М.: Радио и связь, 1983.
25. Научная литература по полупроводникам: Библиография 1920—1952 / Отв. ред. В. П. Жузе. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
26. *Жузе В. П., Гусенкова Е. И.* Библиография по термоэлектричеству. М.: Изд-во АН СССР, 1963.

А. П. Гринберг

К ИСТОРИИ МЕТОДА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ

Современные исследования в области физики высоких энергий и элементарных частиц невозможно представить себе без установок, в которых осуществляются встречные столкновения ускоренных частиц. Метод встречных пучков позволил произвести большой скачок в достижении полученной величины энергии ядерной реакции. В течение многих лет, начиная с 1932 г., когда удалось провести первую ядерную реакцию с использованием искусственно ускоренных заряженных частиц, одним из основных направлений развития ускорителей заряженных частиц было повышение кинетической энергии частиц в пучке на выходе ускорителя. Когда по мере развития ускорителей определенного типа максимальная энергия получаемых с их помощью частиц подходила к своему пределу — иногда принципиальному, а чаще связанному с практическими соображениями, разрабатывались ускорители нового типа, в которых удавалось существенно повысить достижимую энергию частиц ($W_{макс}$). Например, если говорить об ускорении протонов, высоковольтные ускорители с $W_{макс} \simeq 5$ МэВ сменились циклотронами, для которых $W_{макс} \simeq 20$ МэВ. Затем были разработаны фазотроны с $W_{макс} \sim 1$ ГэВ, синхрофазотроны с $W_{макс} \sim 10$ ГэВ и наконец

синхрофазотроны с сильной фокусировкой и с автоматической системой коррекции положения пучка частиц в вакуумной камере, для которых в настоящее время $W_{макс} \simeq 500$ ГэВ.

Стремление физиков работать с частицами со все более высокой энергией вполне естественно: при подъеме на каждую новую ступеньку по шкале энергии ускоренных частиц удавалось открывать новые явления, чрезвычайно существенные для изучения микромира, приобретения принципиально важных новых сведений в физике элементарных частиц. Например, фазотроны дали возможность наблюдать рождение мезонов и проводить совершенно недоступные ранее эксперименты с использованием мезонных пучков. С появлением синхрофазотронов стало возможным работать с пучками антипротонов.

В представленном развитии ускорителей имеется, однако, серьезное препятствие, носящее принципиальный характер: величина энергии, которая может быть полезно использована в ядерном столкновении ускоренной частицы с ядром-мишенью, составляет лишь некоторую долю кинетической энергии частицы-снаряда, причем, что очень существенно, эта доля делается все меньше по мере роста энергии ускоренной частицы.

Рассмотрим подробнее физику этого явления. Первоначальной его моделью может служить столкновение двух одинаковых свинцовых шаров. Если предположить, что тепловая энергия $W_т$, возникающая в системе при столкновении, является полезным эффектом, то максимальная ее величина при столкновении движущегося шара с неподвижным будет получена при так называемом абсолютно неупругом ударе, когда оба шара слипнутся и будут после удара двигаться вместе. Из закона сохранения импульса легко получить, что скорость системы из двух шаров будет составлять $0.5v$, где v — скорость движущегося шара до столкновения. Поэтому кинетическая энергия системы после удара будет равна $W_с = mv^2/4$, что составляет половину кинетической энергии первого шара. Таким образом, в тепловую энергию в наиболее выгодном случае абсолютно неупругого удара переходит только половина кинетической энергии движущегося шара. «Виноват» в этом закон сохранения импульса, в силу которого часть кинетической энергии первого шара обязательно переходит в кинетическую энергию «продуктов» столкновения. В области применимости классической механики доля полезного эффекта (α) сравнительно высока, $\alpha = 0.5$. Оказывается, однако, что в релятивистской механике эта доля зависит от скорости частицы-снаряда и катастрофически падает с ростом этой скорости, так что при очень больших скоростях $\alpha \leqslant 0.5$. Исходная причина — все тот же закон сохранения импульса, который действует и в релятивистской механике. Однако в последнем случае полная энергия $\mathscr{E}$ частицы связана с ее импульсом p соотношением:

$$\mathscr{E} = W + \mathscr{E}_0 = \sqrt{\mathscr{E}_0^2 + p^2c^2}, \qquad (1)$$

где W — кинетическая энергия частицы; $\mathscr{E}_0$ — ее энергия покоя (для протона $\mathscr{E}_0 \simeq 938$ МэВ).

При энергиях, получаемых в современных ускорителях, $\mathscr{E} \gg \mathscr{E}_0$, и в таком случае

$$W \simeq pc. \tag{2}$$

После столкновения налетающей частицы с неподвижной частицей мишени суммарный импульс всех продуктов реакции должен остаться равным первоначальному импульсу p. Это означает, на основании (2), что кинетическая энергия всех продуктов реакции будет мало отличаться от кинетической энергии налетающей частицы. Поэтому лишь небольшая доля энергии частицы-снаряда может быть использована для тех эффектов, для которых, собственно, и организуется данная ядерная реакция, т. е. для рождения новых частиц или возбуждения ядра-мишени.*

Приведенные выше качественные соображения подтверждаются точным расчетом. Величина используемой энергии столкновения, которую мы в дальнейшем будем условно называть «энергией реакции» ($\mathscr{E}_r$), очевидно, равна разности между полной энергией системы и суммарной кинетической энергией частиц-продуктов реакции; а эта разность — не что иное, как величина Mc^2, где M — масса покоя системы частиц после столкновения. Эту величину и надлежит вычислить. Простой расчет с использованием релятивистских формул для случая лобового удара двух частиц с одинаковой массой покоя дает следующий результат [1]:

$$\mathscr{E}_r = \sqrt{2\mathscr{E}_0(\mathscr{E}_0+\mathscr{E})} = 2\mathscr{E}_0\sqrt{1+\frac{W}{2\mathscr{E}_0}}. \tag{3}$$

При $W \geqslant \mathscr{E}_0$

$$\mathscr{E}_r \simeq \sqrt{2\mathscr{E}_0\mathscr{E}} \simeq \sqrt{2\mathscr{E}_0 W}. \tag{4}$$

Из формулы (4) видно, например, что при переходе от протонов с $\mathscr{E} = 10$ ГэВ к протонам с $\mathscr{E} = 500$ ГэВ величина энергии реакции увеличивается всего в 7.1 раза (причем для протона с энергией 500 гЭв $\mathscr{E}_r \sim 30.6$ ГэВ, т. е. $\alpha \simeq 0.06$).

Эффективность использования энергии ускоренных частиц кардинально повышается, если организовать *встречное соударение* двух таких частиц. Даже в области действия законов классической механики получается заметный выигрыш в величине полезной энергии. В случае встречного движения двух шаров при абсолютно неупругом ударе скорость системы после удара равна нулю. Вся кинетическая энергия шаров переходит в тепловую, и $W_r = 2W$, т. е. $\alpha = 1$.

* К наглядному объяснению релятивистского эффекта при столкновении движущейся частицы с такой же неподвижной можно подойти и с другой стороны. Дело в том, что эти одинаковые по массе покоя частицы отнюдь не одинаковы по массе в движении. Например, если электрон с энергией 1 ГэВ налетает на покоящийся электрон, это означает, что с неподвижной частицей сталкивается в 2000 раз более массивная.

При релятивистских скоростях сталкивающихся частиц выигрыш гораздо больше. Поскольку импульс системы до столкновения равен нулю, векторная сумма импульсов продуктов реакции также равна нулю. При пороговых условиях продукты реакции остаются практически неподвижными, их суммарная кинетическая энергия близка к нулю. В этом случае

$$\mathscr{E}_r = 2\mathscr{E}, \tag{5}$$

т. е. $\mathscr{E}_r \gg \sqrt{2\mathscr{E}_0\mathscr{E}}$.

Из сравнения (4) и (5) можно вычислить, какова должна быть энергия частицы ($\mathscr{E}_{экв}$), используемой в обычной схеме, т. е. при бомбардировке неподвижной мишени, чтобы получить такую же величину $\mathscr{E}_r$, как при встречном соударении двух частиц с энергией $\mathscr{E}$ каждая:

$$\mathscr{E}_{экв} \simeq \frac{2\mathscr{E}^2}{\mathscr{E}_0}, \tag{6}$$

или

$$W_{экв} \simeq \frac{2W^2}{\mathscr{E}_0}. \tag{7}$$

Например, при встречном соударении двух протонов, каждый из которых имеет энергию $\mathscr{E} = 30$ ГэВ, получается такая же величина $\mathscr{E}_r$ (равная 60 ГэВ), как при использовании протона в обычной схеме, имеющего, согласно (7), энергию $W_{экв} \simeq 1920$ ГэВ. В настоящее время протонов с такой энергией в распоряжении физиков не только нет, но и не будет еще много лет (до пуска проектируемого ускорительно-накопительного комплекса в Институте физики высоких энергий, с $W_{пр} = 3$ ТэВ). В то же время протоны с энергией ~ 30 ГэВ получены уже сравнительно давно (в 1958 г.), а установка для встречных соударений таких протонов была пущена в ЦЕРНе (Швейцария) в 1971 г.

Еще более разительные цифры получаются для встречного соударения легких частиц — электронов и позитронов. Например, при $W = 10$ ГэВ $W_{экв} = 3.84 \cdot 10^5$ ГэВ!

Итак, метод встречных пучков позволил исследовать явления при очень высоких значениях энергии реакции, недоступных прежним ускорителям. Однако для экспериментаторов, помимо энергии реакции, весьма важен вопрос о количестве (N) изучаемых ядерных столкновений в единицу времени. С самого начала было ясно, что параметр N окажется гораздо меньше при использовании метода встречных пучков, чем в обычных ускорителях. В последних используется твердая или газообразная мишень, тогда как в методе встречных пучков мишенью является совокупность частиц в пучке. Средняя плотность такой мишени, как легко оценить, примерно в 10^{15} раз меньше плотности твердой мишени. (Быть может, еще нагляднее следующее сопоставление: количество частиц в единице объема в типичном пучке ускорителя на 1—2 порядка меньше, чем количество атомов в воздухе в том же объеме при давлении 10^{-6} тор). Поэтому за очень большой выигрыш в величине энергии реакции приходится платить существенным понижением пара-

метра N. Разработка метода встречных пучков стала целесообразной только после того, как в развитии ускорительной техники были достигнуты успехи, позволившие довести ожидаемую величину N до разумных значений.* В настоящее время для повышения параметра N используют такие методы, как большое увеличение тока пучка ($\sim$1 А в случае электронов, несколько десятков ампер — в случае протонов), достигаемое путем накопления многих сгустков ускоренных частиц в специальном устройстве — накопительном кольце; хорошую фокусировку пучков, позволяющую довести диаметр сечения пучка до очень малой величины (в электронных пучках, благодаря действию синхротронного излучения, диаметр сечения пучка может быть снижен до величины порядка 10 мкм); использование чрезвычайно большого числа прохождений пучков через место их встречи (10^{10}—10^{12} прохождений за время жизни частиц в накопителе). Разумеется, для нормальной работы накопителя необходимо получить в его камере чрезвычайно высокий вакуум, $\sim 10^{-10}$ тор.

Обратимся теперь к истории изобретения метода встречных пучков. Любопытно, что авторы многих работ, посвященных этому методу, подчеркивают отсутствие в нем новизны, однако конкретных исторических справок не приводят. Процитируем ряд подобных замечаний. «Основная идея метода возникала независимо у многих лиц в разных местах на протяжении периода более чем в 10 лет» [2, с. 109]. «В 40-х годах некоторые физики выполнили расчет (числа взаимодействия в случае направления двух пучков навстречу друг другу, — *А. Г.*) и пришли к выводу, что, поскольку это число ничтожно мало, метод не имеет практического значения» [3, с. 680]. «Естественно, многие физики понимали тот простой факт релятивистской механики, что в случае неподвижной мишени и использования релятивистских частиц в качестве снарядов имеющаяся в распоряжении энергия... растет как квадратный корень из величины энергии бомбардирующей частицы» [4, с. 626]. «Идея встречных пучков не нова, она является тривиальным следствием теории относительности» [5, с. 534].

Кто же, однако, автор идеи метода встречных пучков? В литературе ссылаются на патент норвежского физика Р. Видероэ, «универсального изобретателя», одного из пионеров ускорительной техники. Правда, часто высказывается мнение, что патенты не следует причислять к «настоящим» публикациям. Верно, что патентная литература, особенно в прежние годы, часто оставалась вне поля зрения научных работников. Однако патентное описание по содержанию нередко эквивалентно журнальной статье.

Идеи, изложенные в 1943 г. в патенте Видероэ [6], до сих пор не анализировались подробно. Между тем ссылку на Видероэ как на изобретателя метода встречных пучков, как будет показано ниже, необходимо сопровождать несколькими оговорками.

* При благоприятных условиях можно получить $N \approx 10^{-7} N_0$, где N_0 относится к случаю бомбардировки неподвижной мишени.

В патенте [6] предлагается помещать рядом с циклическим ускорителем (бетатроном) специальное устройство с вакуумной кольцевой камерой, в которую из ускорителя инжектируются поочередно в противоположных направлениях одинаковые ускоренные частицы (рис. 1). Вспомогательное кольцо здесь называется камерой реакций. В качестве постоянного во времени ведущего поля в таком кольце не может быть использовано магнитное поле, поскольку в этом случае частицы с заданным знаком заряда могли бы обращаться только в одном направлении. Поэтому Видероэ предложил использовать электростатическое поле — поле модифицированного цилиндрического конденсатора. Оно должно быть сформировано таким образом, чтобы обеспечить радиальную и аксиальную устойчивость пучков.

Второй рассмотренный изобретателем вариант изображен на рис. 2. Ускоритель (бетатрон без подмагничивания) снабжен двумя инжекторами; один вводит в него электроны, другой — поочередно протоны. В этом случае можно применить кольцо B с магнитным ведущим полем. Наконец, частицы двух встречных пучков могут быть ускорены в двух отдельных ускорителях (рис. 3).

Цель, для которой следует направить пучки частиц навстречу друг другу, изобретатель излагает следующим образом. При бомбардировке частицами твердой мишени в результате взаимодействия их с электронами происходит быстрое торможение частиц. Вероятность интересующей исследователя ядерной реакции из-за этого существенно уменьшается. Для повышения эффективности использования ускоренных частиц и предлагается метод встречных пучков. Электронов в точке столкновения частиц не будет; кроме

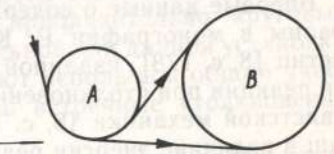


Рис. 1. Схема устройства с одним циклическим ускорителем и одним направлением инжекции частиц в этот ускоритель.

A — ускоритель; B — камера реакций.

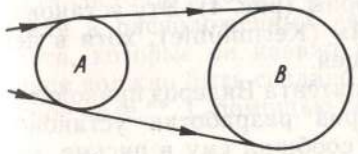


Рис. 2. Схема устройства с одним циклическим ускорителем и двумя направлениями инжекции частиц в этот ускоритель.

Инжектируются частицы с противоположным знаком заряда.

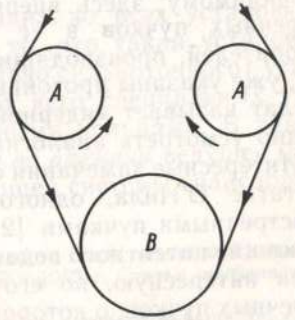


Рис. 3. Схема устройства с двумя циклическими ускорителями.

того, длина пути, вдоль которого будут происходить столкновения, окажется очень большой, так как частицы в каждом из двух пучков могут проделать много оборотов в камере реакций, прежде чем произойдет желаемая ядерная реакция.

В патентном описании есть только одна фраза, касающаяся энергетической стороны метода встречных пучков: «При встречном соударении частиц повышается их относительная скорость и, следовательно, их энергия». Как мы видим, в предложении Видероэ не содержится главной идеи, сделавшей метод встречных пучков столь привлекательным, — идеи об огромном выигрыше в величине энергии реакции, который возникает при очень больших (релятивистских) скоростях взаимодействующих частиц. Кроме того, схема установки со встречными пучками, предложенная Видероэ, только по внешнему виду (см. рис. 1 и 2) очень похожа на схемы современных установок. Однако в патенте нет указаний на то, что вспомогательное кольцо должно быть использовано для накопления многих сгустков частиц из ускорителя для достижения достаточно высокой плотности частиц в накопительном кольце и проведения после этого их встречных соударений. Наконец, в современных установках столкновения частиц осуществляются не во всех точках накопительного кольца, а лишь в специально выбранных участках встречи.

Все сказанное можно резюмировать следующим образом. Видероэ изобрел установку со встречными пучками, но указал не ту цель, ради которой на самом деле имеет смысл строить такие установки. Разумеется, он не предвидел тех важных усовершенствований, которые потребовались для того, чтобы метод встречных пучков стал практически приемлемым.*

Впервые данные о содержании патента Видероэ были опубликованы в монографии Р. Коллата по ускорителям заряженных частиц [8, с. 178], изданной в ФРГ. Коллат приводит расчет энергии реакции при столкновении частиц, пользуясь формулами релятивистской механики [8, с. 175—177], и отмечает большой выигрыш в величине энергии реакции в случае встречного соударения. По-видимому, здесь впервые сформулирована сущность метода встречных пучков в ее современном понимании. В качестве ускорителей, производящих пучки для инжекции в кольцо реакций, уже указаны протонные синхротроны (рис. 4). Эту установку Коллат называет «ядерной мельницей» (Kernmühle), хотя в ней трудно усмотреть аналогию с мельницей.

Интересные замечания об истории патента Видероэ приводятся в статье О'Нила, одного из пионеров разработки установок со встречными пучками [2]. Видероэ сообщил ему в письме, что служащие патентного ведомства, куда попала его заявка в 1943 г., сочли интересную, по его мнению, энергетическую особенность встречных пучков, о которой он писал в первоначальной патентной

* Редакционная заметка [7] журнала «Particle accelerators», отмечая приоритет Видероэ, не анализирует содержание его патента.

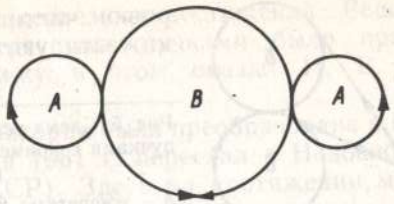


Рис. 4. Вариант устройства с двумя циклическими ускорителями.

заявке, очевидной и совершенно неподходящей для получения патента. В результате ему пришлось выдвинуть другие доводы для обоснования своей идеи. О'Нил добавляет, что «эти другие доводы были совершенно второстепенными и нас не касаются. Основным предложением Видероэ было накапливать частицы с одинаковым зарядом, движущиеся навстречу друг другу по одной круговой орбите. . . Размер кольца с электростатическим ведущим полем был бы огромным даже при умеренной энергии частиц» [2, p. 108].

Первые научно обоснованные и поэтому уже не выглядевшие фантастическими соображения о конструкции установок со встречными пучками были опубликованы в апреле и июне 1956 г. В статье [9] отмечалось, что недавно предложенные Саймоном [11] ускорители с постоянным магнитным полем и сильной фокусировкой (FFAG-ускорители) теоретически дают возможность накапливать необычайно интенсивные пучки частиц.* Это давало повод рассмотреть вопрос о создании установки со встречными пучками. Она может состоять из двух FFAG-ускорителей, расположенных рядом таким образом, что приблизительно круговые орбиты частиц, ускоренных до максимальной для данной установки энергии в каждом из ускорителей, имеют небольшой общий участок, на котором и будут происходить встречные столкновения частиц.

В работе [10] О'Нил выдвинул очень плодотворную идею, которая в дальнейшем была использована во всех установках со встречными пучками. Он указал на то, что такая установка может состоять из обычного (не обязательно сильноточного) ускорителя и расположенных неподалеку от него специальных устройств, которые он назвал накопительными кольцами. В таком кольце должно быть создано *постоянное во времени* ведущее магнитное поле.**. С помощью соответствующей системы транспорти-

* Впервые один из вариантов ускорителей такого типа, названный «кольцевым фазотроном», был предложен в ФИАН СССР в 1953 г. Статья опубликована в 1955 г. [12].

** Это позволяет построить накопитель, диаметр которого меньше диаметра ускорителя, а конструкция его магнитной системы проще, чем в ускорителе. В результате стоимость накопительных колец будет существенно ниже стоимости ускорителя.

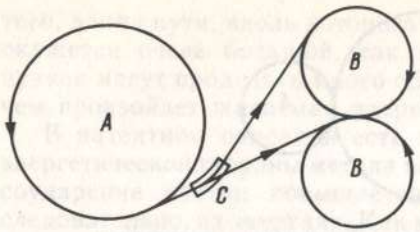


Рис. 5. Схема установки со встречными пучками с применением накопительных колец.

A — ускоритель; *B* — накопительное кольцо; *C* — секторный магнит.

ровки частицы из ускорителя инжектируются в надлежащих направлениях поочередно в накопительные кольца, причем инжекция производится длительное время с целью накопления достаточно большого числа частиц. Схема такой установки показана на рис. 5. Как видно, она выгодно отличается от схем, рассмотренных Видероэ (см. рис. 3 и 4), наличием одного ускорителя-инжектора вместо двух и двух накопительных колец вместо одного.

В работе [10] описан эскизный проект установки, соответствующей рис. 5, с использованием принстон-пенсильванского синхрофазотрона на 3 ГэВ (протон-протонные встречные пучки).

Вскоре доклады по материалам этих работ были представлены на симпозиуме по ускорителям, происходившем в ЦЕРНе, близ Женевы, летом 1956 г. [13]. Этот симпозиум оказался весьма примечательным в истории физики и техники ускорителей. Здесь советские ученые впервые изложили ряд новых идей: описание когерентного принципа ускорения частиц (В. И. Векслер, ФИАН), применение плазменного волновода в линейном ускорителе (Я. Б. Файнберг, ХФТИ), релятивистского стабилизированного пучка (Г. И. Будкер, ИАЭ).

Д. Керст в своем сообщении [14] несколько подробнее, чем в [9], рассмотрел свойства установки со встречными пучками с использованием FFAG-ускорителей. О'Нил [15] повторил материал, изложенный в статье [10]. На симпозиуме была доложена подробная теоретическая работа Саймона и Сесслера [16], в которой впервые была четко сформулирована задача о накоплении частиц в кольцевом накопителе и излагались важные данные о возможных путях ее решения.

В дискуссии выступил Видероэ [13, с. 97]. Он сообщил о своих приоритетных идеях 1943 г. (без ссылки на свой патент) и отметил, что, по его мнению, не следует отбрасывать возможность сооружения накопительного кольца с электростатическим ведущим полем, так как такое кольцо значительно проще по конструкции и дешевле, чем магнитное.

Г. И. Будкер, руководитель лаборатории новых методов ускорения в Институте атомной энергии, вернувшись из Женевы, основным направлением деятельности своей лаборатории решил сделать разработку метода встречных пучков [5]. Впоследствии в статье, посвященной памяти этого выдающегося ученого, А. П. Александров и др. писали: «Конечно, взяться за такую работу было большим риском, но риском оправданным, без которого не бывает и серьезных достижений. Решение о создании установок со встречными пучками было принято не сразу. Большую поддержку в этом оказал И. В. Курчатов» [17, с. 732].

В 1958 г. лаборатория была преобразована в Институт ядерной физики, который в 1961 г. переехал в Новосибирск (Сибирское отделение АН СССР). Здесь на протяжении многих лет велись разработки и сооружение весьма интересных, оригинальных по конструкции установок со встречными пучками. Все новосибирские установки отличаются следующими особенностями: для инжекции в накопительные кольца используются *циклические* ускорители, и применяется такой режим, при котором конечная энергия частиц в накопителе существенно больше энергии инжектируемых в него частиц; доускорение производится с помощью ВЧ-резонаторов, которыми оборудованы накопительные кольца. Разумеется, при таком режиме индукция ведущего поля должна нарастать во времени, т. е. накопительное кольцо в этом случае представляет собой синхротрон.*

Естественно, что в первых проектах рассматривались установки с электрон-электронными встречными пучками. Такие установки существенно проще по конструкции и меньше по размерам, чем в случае пучков тяжелых частиц, и в то же время, как упоминалось выше, уже при сравнительно небольшой энергии электронов метод встречных пучков позволяет получать такие значения энергии реакции, которые совершенно не достижимы в современных обычных ускорителях.

Первая разработанная группой Будкера установка получила название ВЭП-1 (встречные электронные пучки) [18]. Она состояла из инжектора — импульсного безжелезного сильноточного синхротрона, рассчитанного на ускорение электронов до 100 МэВ, и двух магнитных накопительных колец со слабой фокусировкой, со средним радиусом дорожки $r = 43$ см. Максимальная энергия накопленных частиц составляла 130 МэВ в каждом пучке (позже энергия была увеличена до 160 МэВ; отметим, что при такой энергии $W_{\text{экв}} \simeq 100$ ГэВ).

Гораздо более широкий круг вопросов, чем при взаимодействии электронов с электронами, можно исследовать с помощью встречных столкновений электрон-позитрон. Поэтому в конце 1958 г., задолго до завершения строительства ВЭП-1, группа Будкера занялась проектированием второй установки — для получения пучков $e^- e^+$. Это был первый в мире проект такой установки [19]. Она получила название ВЭПП-2 (встречные электрон-позитронные пучки). Ее составные части: инжектор — сильноточный синхротрон, ускоряющий электроны до 350 МэВ, и одно накопи-

* Ускоряющий резонатор необходим в любом накопительном кольце, в том числе и в работающем без доускорения. Он служит для компенсации потерь энергии частицы на синхротронное излучение (при накоплении электронов) или на ионизацию остаточного газа (при накоплении тяжелых частиц).

тельное кольцо типа рейстрек * со слабой фокусировкой, со средним радиусом дорожки 1.5 м. При накоплении пучков частиц с противоположным знаком заряда отпадает необходимость во втором накопительном кольце: при одном и том же направлении ведущего магнитного поля такие частицы будут обращаться навстречу друг другу. С помощью ВЧ-резонатора энергия накапливаемых частиц может доводиться до 700 МэВ.

В 1958—1960 гг. началась разработка установок со встречными пучками типа e^-e^- или e^-e^+ и в других лабораториях. В 1957 г. один из пионеров метода встречных пучков О'Нил (Принстонский университет, США) договорился с В. Панофским из Центра линейного ускорителя Стэнфордского университета о совместной работе по сооружению и использованию накопительных колец [20], в которые электроны будут инжектироваться из стэнфордского линейного ускорителя с рекордной для того времени энергией в 500 МэВ. В 1958 г. началось проектирование накопительных колец и аппаратуры [21] для экспериментов на встречных пучках e^-e^-. Конструкция установки и схема предложенных экспериментов были описаны в отчете стэнфордской лаборатории [22] и в докладах В. Панофского [23] и О'Нила [24]. Проект предусматривал сооружение двух расположенных рядом накопительных колец со слабой фокусировкой, $r = 1.4$ м. Номинальный циркулирующий ток пучка в каждом кольце составлял 1 А.

В 1960 г. появились сообщения о разработке эскизного проекта установки со встречными пучками в Национальной лаборатории Фраскати, близ Рима [25]. Группа под руководством Б. Тушека спроектировала небольшое накопительное кольцо со слабой фокусировкой, с длиной орбиты $L_1 = 408$ см, с энергией 2×250 МэВ.** Позже кольцо было названо ими AdA (Anello di Accumulazione — кольцевой накопитель). Авторы предложили использовать малоэффективную, но зато очень простую и безотказную систему для получения подлежащих накоплению электронов и позитронов: пары e^-e^+ возникают в мишени (конверторе), расположенной в вакуумной камере накопителя, при облучении ее пучком γ-квантов из синхротрона. Переход от накопления электронов к накоплению позитронов в наиболее усовершенствованном варианте производился любопытным способом: вся камера вместе с накопленным пучком поворачивалась на 180° вокруг горизонтальной оси, проходящей через конвертор и центр кольца и перпендикулярной пучку γ-квантов.

* Рейстреком называется кольцевая установка, в которой идеальная замкнутая орбита частицы состоит из двух ($\theta = 180°$) или четырех ($\theta = 90°$) дуг окружности заданного радиуса, соединенных, соответственно, двумя или четырьмя прямолинейными участками. Последние используются для размещения резонаторов, инжекционных устройств и т. п., а также для организации мест встречи пучков.

** Весной 1960 г. Тушек выступил и с другим предложением [26] — о сооружении e^-e^+-накопителя с энергией 2×1.5 ГэВ. На следующий год началось проектирование этой установки [27, 28].

Установка была построена, и в 1961 г. начались попытки накопления частиц [29]. Итальянской группе удалось преодолеть ряд первоначальных трудностей. К 1962 г. на кольце AdA были проведены опыты при малых токах пучков. Цель опытов заключалась только в демонстрации процесса накопления электронов и позитронов и осуществления их встречных соударений. В июле 1962 г. кольцо AdA было перевезено в Орсэ (Франция), где в 1963 г. успешно проведено накопление частиц с энергией до 450 МэВ, инжектируемых из линейного ускорителя.

В Харьковском физико-техническом институте АН УССР в 1960 г. начали разработку установки типа e^-e^- (2×100 МэВ) с использованием линейного ускорителя в качестве инжектора [30]. В установке два накопительных кольца, в каждом — по 4 длинных прямолинейных участка. Длина орбиты $L_1 = 5.74$ м.

В ЦЕРНе в начале 1960 г. начали проектировать накопитель электронов [31], получивший название CESAR (CERN electron storage and accumulation ring). Здесь не предполагалось проведение опытов со встречными пучками. Целью сооружения кольца было получение экспериментальных данных, необходимых для проектирования накопительных колец для протонов. Предварительные соображения о таких кольцах появились в ЦЕРНе за несколько лет до этого. Сильнофокусирующая магнитная система кольца состояла из 12 поворотных магнитов и 24 квадрупольных линз, длина орбиты $L_1 = 24$ м. Энергия накопленных электронов ~2 МэВ. При такой малой энергии и большом радиусе орбиты потери на синхротронное излучение пренебрежимо малы, что и позволяет хорошо моделировать на этой установке накопление протонов.*

В мае 1962 г. в Харьковском физико-техническом институте было созвано совещание по физике и технике метода встречных пучков, по-видимому, первое в мире совещание такого рода. Здесь впервые были приведены сведения об установке ВЭП-1, создаваемой новосибирской группой [18].

В августе 1963 г. в Дубне проходила 4-я международная конференция по ускорителям на высокие энергии. К этому времени накопилось достаточное количество материалов, чтобы организовать два отдельных пленарных заседания, посвященных встречным пучкам и накопителям [33, с. 295—404]. Перечислим коротко сведения о состоянии различных установок, изложенные на этих заседаниях.

Сотрудники Института ядерной физики в Новосибирске сообщали [19, 34], что установка ВЭП-1 находится в стадии запуска, начались эксперименты по накоплению электронов на одну дорожку, заканчивается монтаж установки ВЭПП-2. В ХФТИ полностью собраны накопительные кольца, идет подготовка к исследованию накопления частиц [30]. В Лаборатории линейного

* Подробные данные о конструкции и параметрах установок в Стэнфорде, Фраскати и ЦЕРНе приведены в обзоре А. И. Алиханяна и др. [32].

ускорителя в Орсэ проведено накопление e^-e^+-пучков в кольце AdA. Строится накопительное кольцо e^-e^+ с энергией 2×450 МэВ и сильной фокусировкой [35]. Позже оно получило название ACO (Anneau de Collisions d'Orsay). В ЦЕРНе установка CESAR смонтирована, ожидается ввод частиц в кольцо [31]. В Лаборатории Фраскати строится накопительное кольцо Adone («Большая AdA») с сильной фокусировкой, с энергией 2×1.5 ГэВ. Это первая установка «второго поколения» накопительных колец e^-e^+ с энергией частиц, превышающей 1 ГэВ, а также первая установка e^-e^+ с сильной фокусировкой [26].

Еще через два года были опубликованы результаты первых физических исследований, выполненных с помощью встречных пучков e^-e^-. Принстон-стэнфордская группа [36—39] выполнила эксперимент по рассеянию электронов на электронах на большие углы при энергии 2×300 МэВ. Аналогичные эксперименты провела новосибирская группа по установке ВЭП-1. Их предварительные данные о работе на установке при энергии 2×43 МэВ были сообщены на конференции по ускорителям во Фраскати в сентябре 1965 г. [40]. Более подробный доклад был сделан на международном симпозиуме по электронным и позитронным накопительным кольцам в Сакле (Франция) в сентябре 1966 г. [41, 42]. Результаты работы подтвердили справедливость законов квантовой электродинамики вплоть до расстояний 0.5 Ф с достоверностью 95 %. Помимо этих экспериментов, группа Будкера на установке ВЭП-1 выполнила также исследование двойного тормозного излучения [43].

Доклады этой группы были посвящены описанию первых экспериментов по физике высоких энергий [44, 45], выполненных на позитрон-электронном накопителе ВЭПП-2. Эксперименты этого рода были первыми в мире. Они проводились при энергии 2×380 МэВ, которая соответствует максимальному сечению рождения промежуточного ρ-мезона. Это явление наблюдалось по распаду ρ-мезона на два пиона. За разработку метода встречных пучков Г. И. Будкер, А. А. Наумов, А. Н. Скринский, В. А. Сидоров и В. С. Панасюк в 1967 г. были награждены Ленинской премией.

В 1967 г. физические эксперименты со встречными электрон-позитронными пучками были начаты в Орсэ на установке ACO [46].

Перейдем теперь к краткому обзору истории проектирования и сооружения установок со встречными пучками тяжелых частиц. В самых первых опубликованных заметках об установках со встречными пучками (1956 г.) речь шла именно о пучках тяжелых частиц. Это — упоминавшиеся выше работы Керста и др. [9] и О'Нила [10].

А. А. Коломенский рассмотрел возможность использования так называемого «симметричного» кольцевого фазотрона в качестве установки со встречными пучками [47]. В таком ускорителе магнитное поле в соседних геометрически одинаковых

секторах направлено в противоположные стороны, благодаря чему частицы с заданным знаком заряда могут обращаться как по часовой стрелке, так и против нее. Таким образом, в одном ускорителе можно получить встречные пучки и накапливать их. Аналогичное предложение высказал Т. Окава [48]. Однако развитие техники встречных пучков не пошло по этому пути.

Вудс и О'Нил [49, 50] предложили схему расположения двух накопительных колец, которая в дальнейшем в несколько измененном виде была использована в ЦЕРНе. Два одинаковых по форме кольца, в плане напоминающие треугольники с закругленными углами, были повернуты относительно друг друга на 30° и пересекались в шести точках. Авторы предполагали, что в качестве инжектора протонов в эти кольца будет применен принстон-пенсильванский синхрофазотрон на 3 ГэВ.

О проекте протон-протонных накопительных колец в ЦЕРНе уже упоминалось [31] в связи с описанием установки CESAR. Первоначальный проект был изложен в 1961 г. на 3-й конференции по ускорителям [51]. На 4-й конференции был представлен измененный проект установки [52] с пересекающимися накопительными кольцами ISR (Intersecting Storage Rings). Строительство ее началось в 1966 г., пуск состоялся в январе 1971 г. [53]. В этой установке максимальная энергия протонов составляла 2×28 ГэВ, в форсированном режиме не превышала 2×31.4 ГэВ.

Группа Г. И. Будкера после проектирования установок типа e^-e^- и e^-e^+ обратилась к проекту установки типа *pp*. Был разработан эскизный проект ускорителя с двумя магнитными дорожками, на которых ведущее поле направлено в противоположные стороны [54]. Безжелезная магнитная система ускорителя была рассчитана на получение импульсных полей высокой интенсивности ($B\sim200$ кГс); энергия протонов 2×12 ГэВ.

В 1966 г. новосибирская группа занялась первым в мире проектом установки со встречными протон-антипротонными пучками [55]. Возможность рассмотрения такого варианта встречных пучков возникла в связи с новой идеей Г. И. Будкера. При накоплении протонов из-за отсутствия эффекта радиационного затухания колебаний частиц в ускорителе (этот эффект сыграл первостепенную роль в успешном функционировании электронных накопителей) невозможно накопление большого числа сгустков и получение пучка с очень малым поперечным сечением. Тем не менее создание протон-протонных накопителей считалось возможным, и строительство первой *pp*-установки (ISR в ЦЕРНе) уже началось. Однако сооружение протон-антипротонных установок рассматривалось как совершенно нереальное. В 1966 г. Г. И. Будкер предложил метод демпфирования колебаний тяжелых частиц [56]. В случае успеха экспериментальной проверки появилась бы возможность накопления достаточно интенсивного пучка антипротонов.*

* Независимо от Г. И. Будкера этот метод предложил О'Нил, который назвал его «электронным охлаждением».

На симпозиуме в Сакле в 1966 г. Г. И. Будкер сообщил о начале разработки метода демпфирования колебаний частиц [55] и о начале сооружения протон-антипротонной установки с энергией 2×23 ГэВ. Основное кольцо имело форму рейстрека, $r=45.5$ м, $L_1=366$ м. Проект предусматривал возможность использования этого кольца в качестве накопителя e^-e^+ с энергией 2×6 ГэВ. Более подробно о проекте этой установки члены новосибирской группы сообщили в 1971 г. на 8-й международной конференции по ускорителям [57]. Установка получила название ВАПП—НАП (встречные антипротон-протонные пучки—накопитель антипротонов). В дальнейшем на этой установке успешно проводились эксперименты по электронному охлаждению. Большое кольцо было пущено в электрон-позитронном варианте (ВЭПП-4).

В последние 10—12 лет были спроектированы и построены в разных странах большие накопительные установки. Перечень крупнейших современных установок со встречными пучками, действующих и проектируемых, можно найти в обзоре А. Н. Скринского [58]. Отметим лишь рекордные цифры: в ЦЕРНе с 1981 г. ведутся эксперименты с протон-антипротонными пучками при энергии 2×300 ГэВ. В проекте УНК (ускорительно-накопительном комплексе, Серпухов—Новосибирск) предусмотрены встречные пучки pp и pp с энергией 2×3 ТэВ, $L_1\simeq20.8$ км.

Отметим, что фантастические успехи метода встречных пучков не исключили задачу получения частиц со сверхвысокими энергиями для бомбардировки неподвижной мишени, так как некоторые эксперименты, например с узкими пучками высокоэнергичных вторичных частиц — продуктов ядерной реакции, невозможны в установках со встречными пучками.

По словам акад. А. Н. Скринского, освоение метода встречных пучков является наиболее крупным событием в области физики и техники ускорителей. В настоящее время этот метод — главный в физике предельно высоких энергий и один из главных в физике элементарных частиц. Эксперименты на встречных пучках стали одним из основных источников фундаментальной информации в этих областях физики, и в дальнейшем их значение будет все возрастать.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Арцимович Л. А., Лукьянов С. Ю.* Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1978.
2. *O'Neill G. K.* Particle storage rings. — Sci. Amer., 1966, **215**, N 5, p. 107—116.
3. *O'Neill G. K.* Storage rings. — Sci., 1963, **141**, N 3582, p. 679—686.
4. *Hahn H., Mouth M., Rau R. R.* Proton-proton intersecting storage accelerator facility ISABELLE at the Brookhaven national laboratory. — Rev. Mod. Phys., 1977, **49**, N 3, p. 625—679.
5. *Будкер Г. И.* Ускорители со встречными пучками. — УФН, 1966, **89**, вып. 4, с. 533—547.
6. *Пат. 876279* (*ФРГ*), кл. 21д—36. Anordnung zur Herbeiführung von Kernreaktionen / R. Widerőe. —, Заявл. 8.09.43, опубл. 11.05.53.
7. The first proposal for colliding beams. — Particle Accel., 1972, **3**, N 2, p. 127—128.
8. *Kollath R.* Teilchenbeschleuniger. Braunschweig, 1955.

9. *Kerst D. W., Cole F. T., Crane H. R. a. o.* Attainment of very high energy by means of intersecting beams of particles. — Phys. Rev., 1956, **102**, N 2, p. 590—591.
10. *O'Neill G. K.* Storage ring synchrotron: device for high-energy physics research. — Ibid., N 5, p. 1418—1419.
11. *Symon K. R.* Fixed field alternating gradient accelerators. — Bull. Amer. Phys. Soc., 1955, **30**, N 1, p. 13.
12. *Коломенский А. А., Петухов В. А., Рабинович М. С.* Новый ускоритель заряженных частиц — кольцевой фазотрон. — В кн.: Некоторые вопросы теории циклических ускорителей. М.: АН СССР, 1955, с. 7—12.
13. Proc. CERN symposium on high-energy accelerators and pion physics: Geneva, 11th—23rd June, 1956. Vol. 1: High energy accelerators. Geneva: CERN, 1956.
14. *Kerst D. W.* Properties of an intersecting-beam accelerating system. — Ibid., p. 36—39.
15. *O'Neill G. K.* The storage-ring synchrotron. — Ibid., p. 64—67.
16. *Symon K. R., Sessler A. M.* Methods of radio-frequency acceleration in fixed field accelerators with applications to high current and intersecting beam accelerators. — Ibid., p. 44—58.
17. *Александров А. П., Барков Л. М., Беляев С. Т. и др.* Памяти академика Будкера. — УФН, 1978, **124**, вып. 4, с. 731—735.
18. *Будкер Г. И., Ерозолимский Б. Г., Наумов А. А.* Комплекс установок ВЭП-1 со встречными пучками и постановка опытов по упругому рассеянию электронов. — В кн.: Материалы совещания по физике и технике метода встречных пучков: Харьков, 21—25 мая 1962 г.: В 2-х ч. Ч. 2. Харьков, 1962, с. 5—32.
19. *Ауслендер В. Л., Байер В. Н., Блинов Г. А. и др.* Встречные электрон-позитронные пучки. — В кн.: Тр. междунар. конф. по ускорителям: Дубна, 21—27 авг. 1963 г. М.: Атомиздат, 1964, с. 280—284.
20. *O Neill G. K.* Storage rings. — Sci., 1963, **141**, N 3582, p. 679—686.
21. *O Neill G. K.* Design of a quantum electrodynamics limit experiment. — Bull. Amer. Phys. Soc., 1968, **3**, N 3, p. 170.
22. *Barber W. C., Richter B., Panofsky W. K. H. a. o.* An experiment on the limits of quantum electrodynamics. High energy physics laboratory, Report HEPL 170, 1959.
23. *Панофский В. К.* Электромагнитные взаимодействия и структура нуклонов. — В кн.: Девятая междунар. конф. по физике высоких энергий: Киев, 15—25 июля 1959 г. М.: ВИНИТИ, 1961, с. 277—295.
24. *O'Neill G. K.* Storage rings for electrons and protons. — In: Internat. conf. on high-energy accelerators and instrumentation — CERN, 1959 (Geneva, Sept. 14—19, 1969), Geneve, CERN, 1959, p. 125—134. Перев.: Накопление релятивистских частиц. М.: Атомиздат, 1963, с. 17—33.
25. *Bernardini C., Corazza G. F., Ghogo G., Touschek B.* The Frascati storage ring. — Nuovo cim., 1960, **18**, N 6, p. 1293—1295.
26. *Amman F., Andreani R., Bassetti M. a. o.* Status report on the 1.5 GeV electron-positron storage ring (Adone). — В кн.: Тр. междунар. конф. по ускорителям: Дубна, 21—27 авг. 1963 г. М.: Атомиздат, 1964, с. 249—272.
27. *Amman F.* Preliminary consideration of a proposal for colliding beam accelerator in the GeV region (Adone). — Laboratori Nazionali di Frascati, Nota interna, N 79, 1961.
28. *Amman F., Bassetti M., Bernardini M. a. o.* Proposta per la realizzazione di un anello di accumulazione per elettroni e positroni da 1.5 GeV. — Laboratori Nazionali di Frascati, Nota interna, N 105, 1961.
29. *Ghigo G., Querzoli R., Touschek B.* Progress report on AdA (Frascati storage ring). — Nuovo cim., 1962, **23**, N 1, p. 202—207.
30. *Вальтер А. К., Григорьев Ю. Н., Гришаев И. А. и др.* Установка ФТИ АН УССР для встречных электронных пучков с энергией 2×100 МэВ для опытов по рассеянию электронов на электронах. — В кн.: Тр. междунар. конф. по ускорителям: Дубна, 21—27 авг. 1963 г. М.: Атомиздат, 1964, с. 295—299.
31. *Ferger F. A., Fischer E., Jones E. a. o.* The CERN electron storage ring model. — Ibid., p. 338—346.
32. *Алиханян А. И., Хейфец С. А., Есин С. К.* Накопители электронов и позитронов. — УФН, 1963, **81**, вып. 1, с. 7—49.

33. Труды международной конференции по ускорителям: Дубна, 21—27 авг. 1963 г. М.: Атомиздат, 1964.
34. *Байер В. Н., Блинов Г. А., Бондаренко Л. Н. и др.* Встречные электрон-электронные пучки. — Там же, с. 275—280.
35. The storage ring group. The Orsay project of a storage ring for electrons and positrons of 450 MeV maximum energy. — В кн.: Тр. междунар. конф. по ускорителям: Дубна, 21—27 авг. 1963 г. М.: Атомиздат, 1964, с. 238—294.
36. *Gittelman B.* Recent developments on the Stanford 500 MeV electron storage rings. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1965, **12**, N 3, p. 1033—1041.
37. *Barber W. C., Gittelman B., O'Neill G. K., Richter B.* Wide angle electron-electron scattering on the Princeton-Stanford storage rings. — In: Fifth Internat. conf. on high-energy accelerators: Frascati, Sept. 9—16, 1965. Roma, CNEN, 1966, p. 266—270.
38. *Barber W. C., Gittelman B., O'Neill G. K., Richter B.* Test of the quantum electrodynamics by electron-electron scattering. — Phys. Rev. Lett., 1966, **16**, N 24, p. 1127—1130.
39. *Barber W. C., Gittelman B., O'Neill G. K., Richter B.* Operation of the electron-electron storage ring at 550 MeV. — In: Proc. Internat. symposium on electron and positron storage rings: Saclay, Sept. 26—30, 1966. Presses Univ. de France, 1966.
40. *Budker G. I., Kushnirenko E. A., Naumov A. A. a. o.* Status report on electron storage ring VEP-1. — In: Fifth Internat. conf. on high-energy accelerators: Frascati, Sept. 9—16, 1965. Roma, CNEN, 1966, p. 390—394.
41. *Budker G. I., Kushnirenko E. A., Naumov A. A. a. o.* Electron-electron scattering at 2×135 MeV. — In: Proc. Internat. symposium on electron and positron storage rings: Saclay, Sept. 26—30, 1966. Presses Univ. de France, 1966. Перев.: Атомная энергия, 1967, **22**, № 3, с. 164—168.
42. *Будкер Г. И., Кушниренко Е. А., Лебедев Р. Л. и др.* Проверка квантовой электродинамики в рассеянии электронов на электронах. — Ядерная физ., 1967, **6**, № 6, с. 1221—1225.
43. *Golubnichiy P. I., Onuchin A. P., Popov S. G. a. o.* Double Bremsstrahlung in electron-electron scattering of the energy up to 2 × 160 MeV. — In: Proc. Internat. symposium on electron and positron storage rings: Saclay, Sept. 26—30, 1966. Presses Univ. de France, 1966. Перев.: Атомная энергия, 1967, **22**, № 3, с. 168—173.
44. *Auslender V. L., Budker G. I., Naumov A. A. a. o.* Initial experiments on electron-positron storage ring VEPP-2. — In: Proc. Internat. symposium on electron and positron storage rings: Saclay, Sept. 26—30, 1966. Presses Univ. de France, 1966.
45. *Auslender V. L., Budker G. I., Pestov Ju. N. a. o.* Investigation of the ρ-meson resonance with electron-positron colliding beams. — Phys. Lett., 1967, **25B**, № 6, p. 433—435.
46. *Бельбеох Р., Бергер М., Ле-Дуф Дж. и др.* Новые эксперименты с АСО. — В кн.: Тр. всесоюзн. совещ. по ускорителям заряженных частиц: Москва, 9—16 окт. 1968 г. Т. 1. М., 1970, с. 129—133.
47. *Коломенский А. А.* «Симметричный» кольцевой фазотрон с встречными пучками. — ЖЭТФ, 1957, **33**, вып. 1 (7), с. 298—299.
48. *Ohkawa T.* Two-beam fixed field alternating gradient accelerator. — Rev. Sci. Instr., 1958, **29**, № 2, p. 108—117.
49. *Woods E. J., O'Neill G. K.* Concentric storage rings. — Bull. Amer. Phys. Soc., 1958, **3**, № 3, p. 169.
50. *O'Neill G. K., Woods R. J.* Intersecting-beam systems with storage rings. — Phys. Rev., 1959, **115**, № 3, p. 659—668.
51. *Hereward H. G., Johnsen K., Schoch A., Zilverschoon C. J.* Feasibility of storage rings for the CERN proton synchrotron. — In: Internat. conf. on high-energy accelerators: Brookhaven, Sept. 6—12, 1961. Upton, Brookhaven Nat. Lab., 1962, p. 265—271.
52. *Johnsen K., Middelkoop W. C., de Raad B. a. o.* Some problems connected with the use of intersecting proton storage rings. — В кн.: Тр. междунар. конф. по ускорителям: Дубна, 21—27 авг. 1963 г. М.: Атомиздат, 1964, с. 312—325.

53. The ISR staff (CERN): First observation of colliding beam events in the CERN intersecting storage rings (ISR). — Phys. Lett., 1971, **34B**, N 5, p. 425—427.
54. *Абрамян Е. А., Байер В. Н., Будкер Г. И.* и др. Встречные протон-протонные пучки. — В кн.: Тр. междунар. конф. по ускорителям: Дубна, 21—27 авг. 1963 г. М.: Атомиздат, 1964, с. 284—287.
55. *Budker G. I.* Status report of works on storage rings at Novosibirsk. — In: Proc. Internat. sympos. on electron and positron storage rings: Saclay, Sept. 26—30, 1966. Presses Univ. de France, 1966. Перев.: Атомная энергия, 1967, **22**, № 3, с. 163—164.
56. *Будкер Г. И.* Эффективный метод демпфирования колебаний частиц в протонных и антипротонных накопителях. — Атомная энергия, 1967, **22**, № 5, с. 346—348.
57. VAPP-NAP group / Presented by A. N. Skrinsky. Proton-antiproton colliding beams. — In: Proc. 8-th Internat. conf. on high-energy accelerators: CERN, 20—24 Sept., 1971. Geneva, 1971, p. 72—78.
58. *Скринский А. Н.* Ускорительные и детекторные перспективы физики элементарных частиц. — УФН, 1982, **138**, вып. 1, с. 3—43.

А. И. Слуцкер, В. С. Рыскин

ЭВОЛЮЦИЯ УЧЕНИЯ О ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Сведения о прочности твердых тел, ставшие впоследствии основой целой науки, относятся к одним из самых древних в развитии человеческого знания. Под механической прочностью понимается способность материалов, изделий, конструкций сохранять свою целостность без разрушения при действии на них механических нагрузок или, кратко говоря, устойчивость объектов по отношению к любому механическому воздействию. Естественно, что уже в глубокой древности, когда люди начали создавать различные изделия, орудия труда, охоты, войны, позднее — строительные сооружения, корабли и др., вопросы обеспечения достаточной прочности всего изготовляемого или строящегося становились предметом размышлений, поисков, изобретений. С развитием техники необходимость все большего внимания к прочности возрастала. Новейшие достижения техники и ее потребности не только не ослабили, но еще более подняли актуальность разработки проблемы прочности. Например, авиации стали совершенно необходимыми прочные и легкие материалы (сплавы, главным образом, на основе алюминия). В эпоху же космической техники необходимость материалов с высокой удельной прочностью (большая прочность при низкой плотности материала) стала еще более острой, так как каждый килограмм веса объекта, выводимого на космические орбиты, требует многих килограммов ракетного топлива. Поэтому только одновременным обеспечением большой мощности ракет-носителей и высокой удельной прочности материалов в космических аппаратах можно решить задачу надежной работы людей и конструкций в космосе. Борьба за прочность имеет и огромное экономическое значение. Так, в масштабах техники нашей страны увеличение прочности материалов ведет

к экономии миллионов тонн металлов, бетона, пластмасс, что в настоящее время является одной из важнейших народнохозяйственных задач. Как выражение этого в решениях XXVI съезда КПСС записано: «Разрабатывать и внедрять высокоэффективные методы повышения прочностных свойств. . . металлов и сплавов».*

Отметив историческую и современную актуальность проблемы прочности, рассмотрим основные этапы эволюции учения о прочности, обозначив некоторые философские и методологические вопросы в истории развития этой «механической» науки. Такое рассмотрение представляется уместным, поскольку эта древнейшая по возрасту, но жизненно необходимая и сейчас научная область в своем прошлом и настоящем содержит любопытные поворотные моменты, когда достижения физики приводили к существенному пересмотру прежних представлений и давали новые стимулы для исследований и разработок по проблеме прочности. Заслуживает внимание и то обстоятельство, что начиная с 20-х годов нашего века ведущее положение в развитии физики прочности занял Ленинградский физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Академии наук СССР.

Вплоть до начала XX в. в разработках теории механических свойств твердые тела рассматривались как сплошные среды (упругие или вязкоупругие). В XVIII в. блестящее развитие получила математическая механика, описывающая деформационное поведение твердых тел под нагрузкой (Р. Гук, Ж. Д. Аламбер, Ж. Лагранж, Т. Юнг и др.). Однако подчеркнем, что значения соответствующих коэффициентов упругости или вязкости брались эмпирическими, из феноменологических измерений, без физического обоснования.

Что касается прочности на разрыв, то само явление разрыва выступало перед механиками как некое неожиданное событие. Действительно, образец, казалось бы, имеет возможность еще доформироваться и деформироваться (все коэффициенты допускают это), а он «вдруг» разрывается. Поэтому пришлось вводить эмпирически оправданные, но ни логически, ни физически не обоснованные теории «предельных состояний». В их формировании вслед за Г. Галилеем приняли участие крупнейшие ученые: Г. Лейбниц, Э. Мариотт, Ш. Кулон и др. В этих теориях, по сути, постулировалось то положение, что для каждого материала существуют предельные значения тех или иных напряжений (нормальных или касательных) или же деформаций, при превышении которых тело распадается на части. И с тех пор понятие «предела прочности» как основной прочностной характеристики материалов вошло в научный и инженерный обиход, сохранившись и до наших дней. То обстоятельство, что предел прочности для данного материала мог значительно меняться в зависимости от обработки (отжига, закалки, изменения состава примесей), температуры, скорости или длительности воздействия нагрузки,

* Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Изд-во политлитературы, 1982, с. 145.

вызывало, конечно, вопросы, но не вело тогда к пересмотру предельных представлений.

Отметим два философско-методологических пробела в подходе к проблеме прочности, бытовавших до начала XX в.

1. Игнорирование представлений об атомности строения вещества, которые, начиная, вообще говоря, еще с Демокрита, через идеи передовых естествоиспытателей постепенно (хотя и медленно и в большинстве своем умозрительно) проникали в научное мировоззрение.

2. Носящее метафизический характер игнорирование каких-либо процессов, ведущих к разрыву нагруженного тела, и отношение к явлению разрыва как к критическому акту, что и привело к критерию разрушения в виде достижения «предела прочности». Иными словами, разрушение рассматривалось как критическое событие, а не как процесс.

Все эти обстоятельства, дав к началу XX в. неплохую инженерную основу для расчета прочности конструкций из известных материалов, не могли составить научную основу для повышения прочности, для прогнозирования поведения материалов во все усложнявшихся условиях эксплуатации и испытаний. Постепенное повышение прочности материалов, разумеется, осуществлялось (составление новых сплавов, различные режимы ковки, закалки и т. д.), но это продвижение шло сугубо эмпирически, без выявления сколько-нибудь систематических и научно обоснованных закономерностей. Короче говоря, до начала XX в. наука о прочности оставалась разделом механики, без, казалось бы, естественной связи с физикой.

Поистине революционизирующие для науки о прочности события произошли в десятых годах XX в. К этому времени в физике появились не только прямые доказательства существования атомов (К. Максвелл, Ж. Перрен, Д. Менделеев, Л. Больцман, М. Лауэ и др.), но были непосредственно определены и многие их характеристики (размеры, масса, элементы внутреннего строения). И тогда на смену представления о твердом теле как о некоей сплошной среде, внутренние свойства которой не имели физического обоснования, пришло представление о телах как «конструкциях» из атомов. Сразу же наметилось совершенно очевидное положение о том, что прочность тела как конструкции из атомов должна определяться силами межатомного сцепления. Впервые началось проникновение физических идей и представлений в науку о прочности. Количественная разработка вопроса связи механической прочности тел со сцеплением составляющих их атомов дала буквально потрясший исследователей результат. В начале XX в. значения сил межатомного сцепления были определены на основе использования различных физических методов (оптических, калориметрических, акустических). Большую роль сыграла молекулярная химия, давшая оценку сил связи атомов в различных молекулах. Все эти данные позволили впервые рассчитать так называемую теоретическую прочность твердых тел: то действительно

предельное значение нагрузки, которое может выдержать идеальная конструкция из атомов с известной уже прочностью связей элементов этой конструкции атомов. Расчеты (Ф. Цвикки, Дж. де Бура, М. Борна и др.) привели к значениям теоретической прочности, которые в десятки и сотни раз были выше значений, измеряемых на практике для реальных тел. Разрывную прочность принято измерять в единицах отношения силы к площади поперечного сечения (это можно назвать «отрицательным давлением»). Исторически наиболее распространенной была единица кГ/мм^2. В настоящее время в единой международной системе СИ принята единица 1 Паскаль (Па) или 1 Мегапаскаль (МПа) $=10^6$ Па, 1 МПа $=0.1$ кГ/мм^2. Обычная разрывная прочность материалов находится в диапазоне $10—10^3$ МПа. Теоретическая же прочность лежит в области $(1 \div 4) \cdot 10^4$ МПа.

Таким образом, по расчетам, опирающимся на физические данные, природа заложила в твердые тела огромный ресурс прочности. Ввиду столь ответственного вывода некоторое время многие сомневались в его достоверности. Эти сомнения были рассеяны работами физиков Ленинградского физико-технического института. Главная гипотеза, выдвинутая для объяснения расхождения теоретической и практической прочности материалов, заключалась в том, что дефекты, неоднородности в строении реальных тел приводят к неравномерности «загрузки» действительно очень прочных межатомных связей. В нагруженном реальном теле возникают локальные перенапряжения, где нагрузка на отдельных межатомных связях во много раз превышает среднюю по сечению тела, которой и измеряется обычная прочность тел. Там-то под действием теоретической, предельной нагрузки и начинается разрушение материала, распространяющееся затем на все сечение.

Если эта картина соответствует действительности, то можно постараться убрать дефекты или, по крайней мере, уменьшить их число или опасность, тем самым повысить совершенство структуры тела и в результате ожидать значительного повышения прочности. Так и поступил А. Ф. Иоффе в 1924 г., убирая растворением в воде самые опасные поверхностные трещины образцов из монокристаллов каменной соли. Прочность таких образцов возросла в 400 раз (!) и приблизилась к расчетной теоретической, отставая от нее всего в 2—3 раза. Затем в 1930 г. А. П. Александров и С. Н. Журков достигли при обработке поверхности стеклянных и кварцевых волокон огромной прочности: $0.6 \cdot 10^4 \div 1.3 \cdot 10^4$ МПа, что также было всего лишь в 2—3 раза ниже теоретической. Таким образом, теоретическая прочность стала реальностью. Это сыграло чрезвычайно большую стимулирующую роль для дальнейшего развития науки о прочности и прикладных работ. Раз физический ресурс прочности столь высок, то следует добиваться его сперва частичной, а затем и полной реализации. К настоящему времени для десятков материалов в лабораторных условиях путем направленного управления структурой и дефектностью достигнуты значе-

ния прочности, сравнимые с теоретической. Все время растет и уровень прочности технических материалов. Так, уже в массовых количествах выпускаются проволоки из различных сталей с прочностью $3 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^3$ МПа, полимерные волокна с прочностью $3 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^3$ МПа, стеклянные волокна и массивное стекло с прочностью $5 \cdot 10^3 \div 10 \cdot 10^3$ МПа и т. д.

Таким образом, привлечение в науку о прочности физических представлений и данных об атомах оказалось чрезвычайно плодотворным как в научном, так и в практическом отношениях.

Но исчерпалось ли этим этапом «офизичивания» науки о прочности новое в ее развитии и не оказалась ли она в основном завершенной? Отрицательный ответ дают и конкретные факты, и общие физические и методологические соображения.

Во-первых, достигаемые значения прочности в лабораториях, хотя только и в несколько раз, все же оставались ниже расчетных, теоретических значений.

Во-вторых, о чем уже упоминалось выше, складывалось гносеологически неудовлетворительное положение с представлением о пределе прочности. Действительно, вскрытие физических ресурсов прочности, т. е. получение высоких значений теоретического предела прочности, позволяло, вообще говоря, сохранить и старое понятие предела прочности тела. Однако теперь следовало бы говорить, что разрушение тела наступает тогда, когда в отдельных местах достигается теоретический предел прочности при сравнительно низком среднем напряжении. Если же среднее напряжение не достигает такого значения, при котором концентраторы напряжения на дефектах создадут теоретическое, предельное напряжение на межатомных связях, то разрушение, казалось бы, не должно начинаться. Такой вывод входил в явное противоречие с фактами. На практике и в лабораториях многократно отмечалось, что нагруженные тела разрушаются под напряжением, значительно меньшим, чем предел прочности (не теоретический, а обычный, справочный), но только не сразу, а через то или иное время после приложения нагрузки. Кроме того, пределы прочности сильно зависят от температуры тела, снижаясь, как правило, с ростом температуры. Эти обстоятельства требовали научного объяснения и значительно осложняли, а иногда и заводили в тупик технические расчеты.

И, наконец, в-третьих, привлечение представлений только лишь об атомности строения вещества могло быть и недостаточным. Ведь атомы в твердом теле не находятся в покое. Они совершают колебания, интенсивность которых возрастает с температурой. Разумеется, сразу нельзя было сказать, насколько существенна роль теплового движения в определении прочностных свойств материалов, но постановка этого вопроса является уместной.

К 40—50-м годам накопился комплекс вопросов относительно прочности твердых тел, которые требовали решения. Разумеется, техника, в процессе развития которой повышались рабочие температуры, сложным образом менялись нагрузки на работающих

деталях, строились крупные объекты многолетнего назначения, со своей стороны подталкивала к продолжению углубления науки о прочности, не позволяла считать ее завершенной.

Именно здесь целесообразно обратиться к уже названному выше методологическому недостатку в изучении природы прочности твердых тел — к фактическому отсутствию физических исследований подготовки нагружаемого тела к разрыву. Определенного типа исследования в данной области, разумеется, проводились. Так, много было собрано сведений по постепенному развитию трещин (правда, уже довольно крупных — от долей миллиметра и выше), по структурно-пластическим изменениям в нагружаемых объектах. Однако систематических исследований самого механизма разрушения на атомно-молекулярном уровне до 50-х годов не проводилось.

А ведь представляется очевидным, что до конца понять природу прочности нельзя без физического исследования «контрпрочности» — разрушения. Когда в полном соответствии с диалектической методологией было обращено внимание именно на подготовку разрыва тела, когда разрушение стали рассматривать как процесс, а прочность, т. е. устойчивость тела по отношению к разрушению, как характеристику процесса разрушения вплоть до его перехода к определенной стадии — разрыву тела, тогда и появилась возможность выяснения поставленных выше вопросов. При этом обнаружились неожиданные и новые аспекты в физике прочности. Изучение самого процесса разрушения стало носить кинетический характер. Ясно, что переход к рассмотрению разрыва не как критического акта, наступающего внезапно и как бы неожиданно, а как результата развития процесса разрушения, как результата кинетики разрушения — есть переход от известной метафизичности в науке о прочности к диалектической форме ее изучения.

Кинетические исследования разрушения начались опять-таки в Ленинградском физико-техническом институте в конце 40-х—начале 50-х годов под руководством С. Н. Журкова. А уже в 60-х годах была создана Всемирная организация — Международный конгресс по разрушению (International Congress of Fracture). Характерно, что задачей этой организации было выяснение путей упрочнения материалов и повышения надежности работы конструкций, но названа она была не «Конгрессом по прочности», а «Конгрессом по разрушению». Еще раз подчеркнем, что интересы были не в том, как легче и эффективней разрушать (хотя, к сожалению, и подобные задачи технике приходится решать), а как лучше препятствовать разрушению. Думается, что приведенным примером с постановкой вопроса о прочности в международном масштабе также хорошо демонстрируется важнейшая роль исследования разрушения в решении задач прочности.

Что же дает изучение самого процесса разрушения? Прежде всего была тщательно изучена способность тел разрушаться и при малых нагрузках, когда требовалось то или иное время ждать

разрыва (как отмечалось выше, досадный факт в концепции предельных критериев разрыва). Время ожидания разрыва стало важнейшей кинетической характеристикой разрушения — оно приобрело название «долговечность». Выяснилось, что это время при заданной нагрузке чрезвычайно резко зависит от температуры (снижаясь по показательному (!) закону с ростом температуры). Поскольку температура тела является мерой интенсивности теплового движения атомов, то обнаружившаяся температурная зависимость долговечности позволила решить вопрос о роли теплового движения в разрушении. Оказалось, что эта роль не только существенна, но в значительной мере — решающая. Особый интерес составило выяснение той формы, в которой тепловое движение атомов участвует в процессе разрушения. Дело в том, что отдельные соображения о возможном влиянии теплового движения атомов на прочность тела высказывались давно. Слишком уж очевидной была картина, когда воздействию внешней силы противостоит не статическая система (конструкция из неподвижных атомов), а система, в которой элементы колеблются, «дрожат», и это естественно должно менять степень устойчивости нагруженной системы. Однако оценки показали, что в привычной картине общего теплового состояния твердого тела, когда атомы совершают небольшие колебания около положений равновесия, влияние средних колебаний на прочность весьма мало. И здесь надо подчеркнуть то важнейшее положение, что тепловое поведение атомов в твердом теле не исчерпывается средними небольшими колебаниями. В силу хаотичности теплового движения и связи атомов друг с другом время от времени отдельные атомы приобретают резко повышенные значения энергии (до десятков раз выше средних). Эти события называют флуктуациями энергии. Образно говоря, в твердом теле время от времени в разных точках (на разных атомах или межатомных связях) как бы вспыхивают микровзрывы. С увеличением температуры частота флуктуаций резко (по показательному закону) возрастает. Такая картина теплового движения, в теоретическую разработку которой в 40-х годах решающий вклад внес Я. И. Френкель, явилась большим достижением физики твердого тела и жидкости, поскольку только на основе флуктуационных событий можно объяснить явления диффузии, испарения и т. п. Что же касается разрушения, то, как показал анализ зависимости долговечности от температуры, именно за счет флуктуаций энергии осуществляются разрывы межатомных связей. Таким образом, в добавление к описанной выше структурно-дефектной гетерогенности реальных твердых тел важным фактором разрушения выступила динамическая гетерогенность: неравномерность, неоднородность распределения энергии тепловых колебаний (внутренней колебательной динамики) по объему твердого тела.

Какова же роль нагрузки в разрушении? Ведь ничего не казалось более очевидным, чем то, что внешняя нагрузка, распределившись по межатомным связям, их и разрывает. Оказалось, что

такая очевидность, как уже не раз бывало в физике, не отвечает физической реальности. Внешняя нагрузка лишь напрягает межатомные связи, уменьшая величину энергии их разрыва. А далее напряженные связи «ждут» прихода разрывных флуктуаций. Отсюда и появляется «долговечность» тела — время ожидания достаточного количества последовательных флуктуаций для разрыва достаточного числа межатомных связей и тем самым — разрыва всего тела, т. е. его разрушения.

Флуктуации могут разрывать связи и в ненагруженном теле, но такие разрывы быстро восстанавливаются. В нагруженном же теле восстановление разорванных связей (рекомбинация) резко затрудняется, и идет накопление разорванных связей во времени. Иначе говоря, внешняя нагрузка играет роль своеобразного «вентиля», облегчая флуктуационный разрыв связей и затрудняя их рекомбинацию. Еще раз подчеркнем: сам разрыв связей производит не внешняя сила, а порожденные тепловыми колебаниями флуктуации энергии.

Таким образом, произошел весьма радикальный пересмотр представлений о механизме разрушения твердых тел под нагрузкой. Оказалось, что в представлявшейся простой и очевидной картине механического разрушения обнаружились парадоксальные с позиций привычных понятий формы разрушения. И здесь уместно сказать о поразительном предвидении механизма разрушения, сделанном Ф. Энгельсом еще в 70-х годах прошлого века. В книге «Анти-Дюринг» он писал: «Если он (камень на веревке, — *А. С., В. Р.*) будет висеть достаточно долгое время, то веревка оборвется, как только она вследствие химического разложения окажется недостаточно крепкой, чтобы поддерживать камень».*

Как нам кажется, это один из ярких примеров плодотворного влияния прогрессивной диалектико-материалистической философии на предсказание путей развития наук, в данном случае — одной из естественных наук. Из цитаты видно, что Ф. Энгельс сформулировал самую суть разрушения как процесса не чисто механического, а связанного с внутренней динамикой тела. И опирался он не на конкретные факты, относящиеся к микроструктуре твердых тел (таких фактов тогда просто не было), а на общие физические и химические представления, сложившиеся к тому времени.

Изложенные новые, кинетические представления о механизме разрушения, как всякие более адекватные реальности, чем имевшиеся ранее, оказали большое плодотворное влияние на развитие науки о прочности. Эти представления объяснили многие загадки в области прочности. Появилась возможность вести расчеты работоспособности изделий и конструкций в сложных условиях изменяющихся температур и режимов нагружения. Стали развиваться и прочностные исследования нового типа.

* *Энгельс Ф.* Анти-Дюринг. — *Маркс К., Энгельс Ф.* Соч. 2-е изд., т. 20, с. 61.

Коль скоро разрушение есть процесс, происходящий во времени, то, естественно, необходимо исследование конкретных форм и деталей этого процесса. Выводы о флуктуационном механизме разрыва напряженных межатомных связей носят самый общий характер, они составляют физическую основу процесса разрушения, но, разумеется, не исчерпывают всего содержания этого процесса. Последние десятилетия характеризуются небывалым до того размахом в использовании множества тонких физических и физико-химических методов для получения прямой информации о конкретных формах и деталях процесса разрушения. Так, выясняются структурные особенности материалов, создающие места повышенных напряжений, где наиболее интенсивно развивается термофлуктуационный процесс разрушения. Непосредственно регистрируются разрывы межатомных связей и измеряется накопление этих разрывов. Прослеживается очень важный этап разрушения — переход от одиночных разрывов связей к возникновению зародышевых разрывов сплошности — мельчайших трещин (с размерами в десятки — сотни размеров атомов). Далее выясняются закономерности укрупнения зародышевых трещин, которое может идти путем как индивидуального роста трещин, так и их слияния. После достаточной степени укрупнения трещин формируются магистральные трещины, прорастание которых через сечение образцов и приводит к разрушению. Очень важно подчеркнуть, что на всех отмеченных этапах разрушения выявляется единый атомно-молекулярный механизм — флуктуационный разрыв напряженных связей. Таким образом, представление о разрушении как о процессе, подводящем нагруженное тело к разрыву, наполняется конкретным и детальным содержанием. Именно эта информация открывает новые пути упрочнения материалов, увеличения их работоспособности, продления их долговечности. Эти же данные позволяют решать важные задачи прогнозирования работоспособности уже эксплуатируемых систем, выяснения степени исчерпания их прочностных ресурсов со временем.

Поэтому сейчас можно говорить о том, что исследования прочности вышли на новый и плодотворный этап. Многообразие материалов и условий, в которых они работают, выдвигает широкий круг задач, связанных с кинетическими (как феноменологическими, так и микроскопическими) исследованиями. Для их решения потребуются еще многие годы. Но есть основания считать, что решающие методологические основы в подходе к разработке проблемы прочности уже найдены.*

Глубокое проникновение общих физических положений в науку о прочности (атомное строение твердых тел, тепловые колебания атомов, флуктуации на этих колебаниях) делает разработку этой науки очень интересной, позволяет говорить о «физике

* Анализ данных по кинетике разрушения, а также библиографию по этому вопросу можно найти в монографии: *Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М., 1974.

прочности». И поэтому вопросы, которые и сейчас решаются в науке о прочности, связаны с проблемами самой физики.

В качестве примера можно привести вопрос о механизме разрушения при низких температурах. Тепловые колебания с понижением температуры должны ослабляться вплоть до полного затухания. Тогда должны исчезнуть и флуктуации энергии тепловых колебаний, а следовательно, отпасть и термофлуктуационный механизм разрыва связей. Наконец-то, казалось бы, можно получить статический случай разрушения, т. е. взаимодействие внешней нагрузки и неподвижной конструкции из атомов и разрывы межатомных связей только за счет внешней механической силы. Однако фундаментальные квантовые законы физики утверждают, что в твердых телах колебания атомов не прекращаются и при абсолютном нуле температуры. Остаются так называемые нулевые квантовые колебания, существование которых является прямым следствием принципа неопределенности (этот принцип отражает неадекватность нашего представления об атоме как о частице с определенными координатами и импульсом). Нулевые колебания — вполне обоснованная (экспериментально и теоретически) реальность. Поскольку твердое тело «не замерзает» и при самых низких температурах, то и здесь возможны флуктуационные эффекты (так называемые туннельные переходы), а следовательно, и кинетика разрушения при самых низких температурах. Вопрос об участии квантовых флуктуаций в процессах химического типа в твердых телах только недавно начал разрабатываться в физике. Тем не менее предположения о возможности квантово-флуктуационной кинетики разрушения уже высказаны, теоретические оценки произведены и эксперименты начаты. Первые результаты показали соответствие низкотемпературных закономерностей разрушения ряда твердых тел соображениям о квантовых флуктуациях. Этот пример показывает, что наука о прочности не только использует уже укрепившиеся фундаментальные положения физики, но и развивается непосредственно с развитием самой физики.

Подводя итоги, хочется еще раз подчеркнуть то сравнительно бурное развитие, которое прошла и проходит древняя наука о прочности. Есть все основания говорить о том, что эта наука далеко еще не достигла «финиша». Особо требуется отметить то обстоятельство, что подход к разрушению именно как к процессу дал основание рассматривать механическую прочность тел как такое свойство, которое имеет не «чисто механическую» природу, определяемую только силовым взаимодействием атомов, а кинетическую природу, определяемую закономерностями внутренней атомной динамики в твердых телах. Поэтому кинетический подход к разработке проблем прочности является той основой, которая правильно отражает существенные стороны физической природы прочности и в настоящее время является необходимой для дальнейшего развития науки о прочности.

В. С. Куксенко, В. А. Петров

ФИЗИКА РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Согласно данным сейсмологии, геологии и геофизики, землетрясения являются следствием выделения запасенной в материале Земли энергии тектонических напряжений (обусловленных неравновесностью блокового строения земной коры) при образовании в нем трещин. Аналогичным образом — путем трещинообразования происходит разрушение нагруженных твердых тел. Осознание этой общности характеризует современный подход к становящейся все более актуальной проблеме прогноза землетрясений. Его отличительной чертой является интерес к физике разрушения твердых тел и стремление использовать ее достижения для целей прогноза землетрясений. Такой интерес вызван тем, что сейчас эмпирически найдено уже около 300 различных природных аномалий, предшествующих землетрясениям, но их использование в качестве предвестников не позволяет надежно и с необходимой точностью прогнозировать место и время наступления землетрясения. В настоящее время все более укрепляется мнение о том, что решение проблемы прогноза землетрясения невозможно без учета его физического механизма. Помимо этого практического аспекта, взаимная заинтересованность физики и сейсмологии обусловлена, по-видимому, стремлением к созданию единой картины мира нагруженных и разрушаемых тел на основе установления общих закономерностей.

Такая картина возникла и развивается. В ее генезисе выделяются три характерных периода. Первоначально разрушение рассматривалось феноменологически и определялось как предельное состояние бесструктурного континуума, наступающее, когда приложенное напряжение достигает величины некоего предела прочности. Затем было учтено атомное строение тел и их реальная структура, характеризующаяся наличием различных дефектов, в частности трещин, которые способны небольшие средние напряжения локально повысить до значения предела прочности. Современный период характеризуется становлением термофлуктуационной концепции, с позиций которой разрушение притяжения между атомами осуществляется флуктуациями их теплового движения.

Как видно, подход к проблеме разрушения находится под воздействием атомно-кинетических представлений о строении твердых тел, развитие которых и стимулировало переход от рассмотрения бесструктурного континуума к изучению реакции на нагрузку сначала статических, а затем динамических атомных структур.

Три названных периода определяются различием в понимании критерия локального разрушения, который, играя роль базиса в картине разрушения, служит основой для объяснения многообразия явлений разрушения и прочностных свойств. Поэтому

смена периодов имеет природу революционных скачков, что проявляется в возникновении острых дискуссий.

Проблема прогноза времени разрушения может быть поставлена лишь благодаря открытию его термофлуктуационной природы. В самом деле, с позиций представления о пределе прочности как характеристике материала тело под нагрузкой может находиться только в двух дискретных состояниях: исходном и разрушенном. Поэтому в условиях действия постоянного напряжения, которое ниже предела прочности, разрушение принципиально невозможно и, когда оно наступает, не может быть объяснено и предсказано: для наблюдателя разрушение наступает внезапно и совершенно случайно. С позиций термофлуктуационной концепции разрушение является закономерным итогом процесса, который непрерывно протекает во времени и пространстве нагруженного тела, повреждая все большие его объемы. Введя удобную для регистрации характеристику поврежденности, очевидно, можно в принципе следить за развитием этого процесса, фиксируя место и время разрушения выбранного масштаба.

Эта возможность конкретизирована и реализована в лабораторных условиях. Найдено, что механизмом разрушения твердых тел является зарождение множества хаотически расположенных стабильных трещин. Трещинообразование приводит к обусловливающему причинность разрушения выделению запасенной в нагруженном теле упругой энергии, экспериментально регистрируемой в виде выхода летучих продуктов разрушения, тепловой, электронной, электромагнитной и акустической эмиссий. Физической характеристикой поврежденности является среднее расстояние между трещинами в единицах их размера — безразмерная величина K. Когда ее значение становится равным e ($e \approx 3$ — основание натуральных логарифмов), в результате статистической флуктуации концентрации накапливаемых трещин некоторые из них случайно оказываются рядом и объединяются — образуется кластер, укрупненная трещина. Условие $K = e$ получило название концентрационного критерия укрупнения трещин (кластеризации). Укрупнение трещин приводит к образованию зон с повышенными напряжениями — последующее трещинообразование, происходящее в основном в этих зонах и характеризующееся повышенным энерговыделением по сравнению с первоначальным. Таким образом, используя различные методы регистрации энерговыделения, можно фиксировать моменты формирования укрупненных трещин и кинетику их дальнейшего роста, переводящего процесс разрушения на более высокий масштабный уровень. В настоящее время эта методика позволяет с высокой точностью прогнозировать запас времени до разрушения лабораторных образцов.

Лежащий в основе современного физического подхода к прогнозированию разрушения концентрационный критерий обладает рядом замечательных свойств.

В ходе непрерывно протекающего во времени процесса накопления начальных трещин кластеризация наступает очень резко, подобно скачку. Этот скачок реализует переход количества накопленных трещин в новое качество, возникающее вследствие формирования укрупненных трещин, которые, как отмечалось, переводят процесс разрушения в следующую стадию.

Формирование укрупненных трещин можно рассматривать как возникновение новой стадии структурной самоорганизации твердого тела, оказавшегося в неравновесном состоянии в результате приложения к нему нагрузки. Такое структурообразование осуществляется через статистические флуктуации, что находится в соответствии с установленной в настоящее время общей закономерностью развития неравновесных систем.

Концентрационный критерий генерации трещин позволяет прогнозировать случайный процесс и определять его пространственно-временную локализацию. Однако время и место разрыва образца нельзя определить с большой точностью — здесь можно сформулировать аналог квантово-механического принципа неопределенности. Присущий современной физической картине мира статистически-вероятностный характер проявляется и при описании разрушения, будучи обусловленным случайным характером тепловых флуктуаций.

Наличие аналогичных концентрационному критерию пороговых характеристик присуще и ряду других физических явлений в сильно неоднородных средах: фазовым переходам, электропроводности растущих пленок и т. д. Возникновение этих явлений подобно протеканию (перколяции) жидкости требует некоторого кластера связей («капилляров»), который формируется при достижении в системе определенной концентрации случайных связей — порога перколяции. Перколяционные эффекты свойственны не только физическим объектам. Они наблюдаются, например, при распространении эпидемических заболеваний. В этом аспекте концентрационный критерий укрепления трещин выступает как проявление общей закономерности развития кластеризующихся процессов.

Общность концентрационного критерия в классе явлений разрушения в настоящее время экспериментально проверена для самых различных тел: полимеров, металлов и сплавов, композитов, горных пород при их растяжении, сжатии и изгибе. Исследование с помощью разнообразных методик объектов из различных материалов и различного масштаба позволило варьировать размер трещин в диапазоне 12 порядков — от 100Å до 10 км. При этом концентрация трещин варьировалась более чем на 35 порядков. Однако, несмотря на гигантские диапазоны, отнесенное к размеру трещин среднее расстояние между ними к моменту разрушения всегда оказывалось достаточно близким к расчетной величине 3!

Надо отметить, что эмпирически концентрационный критерий кластеризации устанавливается лишь после разрушения образца, в связи с чем приобретает значение критерий разрушения. Однако при этом, будучи опосредованным через кинетику накопления

6 Заказ 1006

трещин, которой обычно после бурного начала свойственно сравнительное «затишье», он часто не проявляется как критериальная величина. Здесь реализуется принцип марксистской философии о несовпадении явления и сущности. В такой ситуации одних эмпирических данных для утверждения концентрационного критерия недостаточно. Необходимо выйти за рамки конкретного опыта и абстрагироваться от вуалирующего действия кинетики трещинообразования. Эта цель достигается путем построения статистико-геометрической теории и моделирования развития ансамбля трещин, в которых могут быть исключены кинетические явления путем разделения пространственного и временного эффектов.

В настоящее время справедливость представлений о концентрационном критерии подтверждена воспроизводимым экспериментом, теорией и данными моделирования на ЭВМ, осуществленным различными группами. Отметим наличие и следующих внеэмпирических критериев истины. Явление разрушения, особенно при рассмотрении структуры деформированного нагрузкой и разрушаемого тела, выглядит крайне сложным. Поэтому обнаружение простого числового критерия представляется удивительным. В простоте и связи с числом e мы видим одно из доказательств истинности концентрационного критерия. Тем более, что эта простота является динамической. Будучи установленным впервые для трещин размером в 100 Å, образующихся при растяжении полимеров, концентрационный критерий без каких-либо изменений и усложнений сохранил свое значение при расширении класса материалов, размеров трещин и вида напряженного состояния. Кроме того, формулы, лежащие в основе теоретического вывода концентрационного критерия кластеризации, позволили описать также ряд эффектов, сопутствующих кластеризации.

Отмеченные свойства концентрационного критерия — универсальность и нечувствительность к размеру исследуемых трещин, прогностическая ценность — поднимает вопрос о существовании соответствующего аналога в сейсмических явлениях. Постановка вопроса оправдана тем, что процессы разрушения лабораторных образцов и объектов различного масштаба из горных пород качественно подобны и связаны с кинетическим процессом зарождения и накопления множества трещин. Но имеется ли и количественное подобие в явлениях, разнесенных по шкале размеров на 12 порядков, например в явлениях, протекающих в полимерах на базе трещин в 100 Å и регистрируемых лишь самыми тонкими современными физическими методами и в десятикилометровых трещинах при землетрясениях, разрушительное действие которых сопоставимо со взрывом мегатонных бомб? Положительный ответ отчасти содержится в приведенных выше данных по экспериментальной верификации концентрационного критерия, которые включают в себя результаты исследования не только лабораторных образцов, но и землетрясений. Последние получаются путем перевода силы землетрясения (выделенной энергии) в размер соответствующих трещин, подсчета их концентрации и величины K

в сейсмоактивной зоне. Сейчас таким методом обработаны каталоги землетрясений (содержащие десятки тысяч событий) Курило-Камчатского региона и района водохранилища Нурекской ГЭС. Величина K оказывается достаточно близкой к ее статистической оценке и величине, измеряемой в лабораторных условиях.

Эти первые результаты вселяют надежду на плодотворность союза сейсмологии с физикой разрушения для решения проблемы прогноза землетрясений. Возникает следующая простая модель временно́го прогноза формирования крупной трещины — землетрясения определенного энергетического класса. В объектах блочного строения типа горных пород гетерогенность приводит к наличию различного рода границ раздела, являющихся стопорами для растущих трещин, так что размер области гетерогенности задает размер стабильных трещин r_j, $j = 1, 2, \ldots, n$. Назовем величину j рангом трещины, а число n — рангов в теле — его масштабом. В многомасштабном объекте трещина j-го ранга может быть образована лишь из трещин j — 1-го ранга путем их накопления до критической концентрации. В этой связи момент появления j-трещины контролируется кинетикой накопления трещин j — 1-го ранга. Переходя от хорошо изученных первичных трещин, зарождаемых путем термофлуктуаций, к выбранной большой величине j, можно построить цепочку иерархически связанных кинетических уравнений, которые будут в принципе решать задачу временно́го прогноза «крупного» разрушения.

Существенно, что в этой модели подъем по иерархической лестнице сопровождается только количественными, но не качественными изменениями. И здесь появляются сомнения: справедливо ли это относительно землетрясений, неужели природа так монотонна и однообразна или, более широко, в какой мере применимы представления физики при ее внедрении в сейсмологию? Окончательного ответа пока нет.

Исходя из диалектико-материалистического принципа единства мира, естественно ожидать самой глубокой связи далеких, на первый взгляд, наук. Следует, однако, иметь в виду, что такая связь является взаимной. В данном случае это означает, что при перенесении представлений физики разрушения лабораторных образцов — своего рода макромира — в область объяснения сейсмических событий — мегамир, неизбежна корректировка макрофизики, подобно тому как это имело место при переходе к исследованию микромира атомов и элементарных частиц. Обогащенная таким образом физика разрушения явится тем фрагментом научной картины мира, который в рамках единой концепции описывает реакцию на нагрузку тел различного масштаба.

Физика и прогнозирование разрушения объектов под нагрузкой (вплоть до землетрясений) обладают рядом аспектов общефилософского характера.

Стержень современного подхода к проблеме прогноза разрушения — концентрационный критерий укрупнения трещин — выступает как скачок в процессе перехода количества накопленных трещин в их новое качество. Этот переход как стадия самоорганизации структуры нагруженного тела осуществляется путем статистических флуктуаций, что придает процессу разрушения неопределенность, аналогичную квантово-механической. Концентрационный критерий характеризуется общностью и простотой, однако наблюдаемые на опыте явления разрушения часто не соответствуют ему непосредственно. Здесь требуются теоретический анализ и машинное моделирование.

Решение проблемы прогноза землетрясений рассматривается как многопорядковая экстраполяция физических закономерностей разрушения на иерархические структуры трещинообразования в земной коре. В философско-методологическом плане прогноз землетрясений строится на принципе материального единства мира и диалектической взаимосвязи наук. В основе исторического развития картины разрушения нагруженных тел лежат представления об атомно-кинетическом строении материи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А.* Можно ли прогнозировать разрушение? — В сб.: Будущее науки. М.: Знание, 1983, с. 99—107.
2. *Мячкин В. И.* Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978.
3. *Мостепаненко М. В.* Философия и методы научного познания. Л.: Лениздат, 1972.

КОСМОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ

Д. А. Варшалович, С. А. Левшаков

СПЕКТРОСКОПИЯ КВАЗАРОВ И КОСМОЛОГИЯ

Наши знания об эволюции Вселенной, наши представления об ее крупномасштабной структуре существенно расширились и уточнились за последние годы. Этот прогресс в космологии в значительной мере связан с исследованиями квазаров — самых удаленных и загадочных объектов Вселенной. Расстояния до некоторых из них достигают значений в 10—20 млрд световых лет. Это значит, что мы видим эти объекты такими, какими они были 10—20 млрд лет тому назад, когда наша Вселенная была значительно моложе, когда «возраст» ее был в 5—10 раз меньше современного, т. е. задолго до образования нашей Солнечной системы.

На таких огромных расстояниях даже самые яркие члены далеких скоплений галактик — гигантские эллиптические галактики — практически уже не видны, поскольку их излучение оказывается значительно слабее фонового излучения ночного неба. Квазары же видны потому, что являются самыми мощными из известных нам источников энергии. Их мощность, или светимость, имеет величину 10^{46}—10^{48} эрг/с, т. е. 10^{39}—10^{41} Вт. Это фантастически огромная мощность. Если бы эта энергия выделялась в результате термоядерного синтеза (например, в результате превращения водорода в гелий), то для поддержания такого энерговыделения потребовалось бы «сжигать» в качестве горючего водород в количестве нескольких тысяч солнечных масс в год. А ведь квазары светят, по всей вероятности, в течение миллионов лет. Мощность одного квазара в тысячи раз превосходит мощность излучения всей нашей Галактики, содержащей сотни миллиардов звезд. В то же время по своим размерам квазар, точнее область основного энерговыделения в квазаре, в миллиарды раз меньше размеров Галактики и целиком помещается внутри Солнечной системы. Вывод о столь малых размерах квазаров следует из того факта, что поток жесткого рентгеновского излучения некоторых квазаров существенно изменяется за время τ порядка 3 мин, а следовательно, излучающая область этих квазаров не превосходит величину $c\tau = 6 \times 10^{12}$ см $= 0.4$ а. е. (1 а. е. $= 1.5 \times 10^{13}$ см).

В настоящее время считается, что квазары — это находящиеся в активном аномальном состоянии ядра гигантских спиральных галактик. Масса этих ядер равна 10^{6}—10^{10} масс Солнца. Источником энергии, по всей вероятности, является гравитацион-

ная энергия, выделяющаяся при падении вещества на тело с высоким гравитационным потенциалом. По-видимому, это сверхмассивные черные дыры, хотя имеется много других точек зрения на происхождение энерговыделения квазаров. Несмотря на большое количество гипотез, физическая природа квазаров по существу остается неизвестной на протяжении 20 лет со времени их открытия.

Открытие квазаров

Честь открытия квазаров принадлежит голландскому астрофизику Мартину Шмидту. История открытия такова. Выполняя обзор неба, радиоастрономы обнаружили к 1959 г. несколько сот точечных источников радиоизлучения, т. е. источников малых угловых размеров. Поэтому их назвали первоначально радиозвездами. В 1960 г. австралийским радиоастрономам удалось достаточно точно измерить координаты одной из таких радиозвезд — 3С 48 (объект под номером 48 в 3-м Кембриджском каталоге) методом покрытия этого объекта диском Луны. Оказалось, что эту радиозвезду можно отождествить со слабой звездой 16-й величины. Американские астрономы Т. Мэтьюз и А. Сэндидж, работая на самом крупном в то время 5-метровом телескопе Хэйла Паломарской обсерватории, получили спектр в оптическом диапазоне длин волн источника 3С 48. Этот спектр поверг всех астрономов в изумление — он не был похож ни на спектры звезд, ни на спектры туманностей или галактик. Линии в спектре 3С 48 не удалось отождествить ни с одной из известных спектральных линий. Около трех лет этот спектр оставался нерасшифрованным.

В 1963 г. австралийские радиоастрономы измерили координаты еще одного радиоисточника 3С 273. Он был отождествлен с довольно яркой голубой звездой 13-й величины, спектр которой также содержал неизвестные линии излучения. Мартин Шмидт был первым, кто высказал идею о том, что длины волн всех линий излучения в спектре 3С 273 смещены в красную сторону на 16 %, точнее, относительная величина смещения $z=(\lambda-\lambda_0)/\lambda_0=0.158$, где λ — наблюдаемая, а λ_0 — лабораторная длина волны линии излучения. До этого времени астрономам еще не приходилось сталкиваться со столь большим красным смещением линий. Оно могло быть обусловлено тем, что источник удаляется от нас со скоростью, составляющей ~ 16 % от скорости света. Эта идея дала ключ к расшифровке других спектров квазаров. Сразу же Дж. Гринстейн и Т. Мэтьюз отождествили линии излучения в спектре 3С 48 с линиями известных элементов, также смещенными в красную сторону спектра. Но величина сдвига оказалась еще большей $z_e=0.367$, т. е. скорость удаления составляет почти 37 % от скорости света. Поскольку эти удивительные источники радиоизлучения выглядели на снимках как звезды, их назвали квазизвездными объектами, или квазарами.

Природа красного смещения

К настоящему времени исследованы спектры около 3000 квазаров. У большинства из них величина красного смещения z оказалась больше 100 % (!). Известны около полусотни квазаров с параметром $z_e>3$. В их спектрах длины волн линий смещены более чем на 300 %, и, соответственно, измеренные значения длин волн $\lambda=\lambda_0(1+z)$ увеличены более чем в 4 раза. Поэтому в видимый диапазон попадают линии из области далекого (вакуумного) ультрафиолета.

Для объяснения большого красного смещения линий в спектрах квазаров выдвигалось несколько гипотез. Пытались рассматривать квазары как сравнительно близкие объекты, двигающиеся с релятивистскими скоростями, и объяснять смещение линий обычным эффектом Доплера, или гравитационным красным смещением. Но все эти объяснения оказались несостоятельными.

Общепринятой в настоящее время можно считать космологическую гипотезу, согласно которой наблюдаемое красное смещение линий объясняется общим космологическим расширением Вселенной. Это расширение было предсказано советским ученым А. А. Фридманом в 1922 г. и в результате наблюдений открыто в 1929 г. американским астрономом Эдвином Хабблом. Анализируя спектры галактик, Хаббл пришел к удивительному выводу, что все галактики (точнее, скопления галактик) удаляются от нас и удаляются тем быстрее, чем дальше от нас они находятся. Другими словами, чем больше величина красного смещения линий $z=v/c$ (при $z\ll 1$), тем больше расстояние до излучающего объекта. Для далеких галактик скорости их удаления v пропорциональны r — расстояниям до них, $v=H_0 r$. Это и есть знаменитый закон Хаббла, справедливость которого можно считать проверенной в настоящее время вплоть до скоростей $v\simeq 0.3$ с. Коэффициент пропорциональности H_0 есть фундаментальная космологическая постоянная, определяющая темп расширения Вселенной. Ее современное значение $H_0=(2.5\pm 0.8)\times 10^{-18}$ с$^{-1}$. В соответствии с законом Хаббла, квазары, для которых красное смещение намного больше красного смещения самой далекой из известных галактик, наблюдавшихся до настоящего времени ($z\leqslant 0.637$), находятся от нас на расстояниях, значительно превосходящих расстояния до галактик. Этот вывод в ряде случаев подтвержден прямыми наблюдениями. Если угловое расстояние между наблюдаемой галактикой и квазаром мало, так что галактика частично проектируется на квазар, абсорбционный спектр квазара содержит линии, обусловленные поглощением излучения квазара в межзвездном газе этой галактики. Это неоспоримо свидетельствует о том, что данный квазар находится от нас дальше, за этой галактикой.

Статистический анализ квазаров

Анализ углового распределения квазаров на небесной сфере свидетельствует о том, что они распределены изотропно и совершенно случайно, т. е. какая-либо взаимная корреляция в их угловом распределении отсутствует. Среднее расстояние между квазарами при $z = 1.8—2.2$ составляет ~ 400 млн световых лет. Это согласуется с тем, что наша Вселенная в больших масштабах ($\geqslant 400$ млн световых лет) однородна и изотропна. Таким образом, анализ углового распределения квазаров позволяет получить наблюдательное обоснование одного из основных положений космологической модели — предположения об изотропии и однородности Вселенной.

Еще более важные и неожиданные результаты дал статистический анализ распределения квазаров по величине красного смещения их эмиссионных линий z_e. Это распределение дает нам информацию о том, какова была численность квазаров в прошлые космологические эпохи. Оказалось, что концентрация квазаров в прошлом была выше, чем в настоящее время, причем это увеличение концентрации значительно превышает естественное изменение концентрации объектов в пространстве в $(1+z)^3$ раз, обусловленное общим космологическим расширением. Так, по оценке М. Шмидта, при $z = 2$ концентрация квазаров была примерно в 1000 раз выше, чем в нашу эпоху при $z = 0$. Это свидетельствует о том, что в «молодой» Вселенной квазары были чрезвычайно активны, т. е. в ту эпоху было много мощных источников энерговыделения. К настоящему времени они почти полностью исчезли или стали неактивными.

Экстраполируя эти результаты, можно было ожидать, что квазары с еще большими значениями z_e будут еще более многочисленны. Но это оказалось не так. После $z_e \simeq 3.2$ концентрация квазаров начинает резко падать, и начиная с $z = 3.8$ пока не удалось обнаружить ни одного квазара. Таким образом, красные смещения квазаров имеют предел, хотя астрономические средства позволяют наблюдать квазары со значительно большими значениями z_e. По-видимому, квазары «внезапно» образовались в эпоху при $z \sim 3—4$, произошел мощный всплеск их активности. Все это дает основания думать, что мы видим квазары от стадии их рождения до эпохи затухания их активности. Следовательно, изучение квазаров дает наблюдательные основания говорить о глобальной эволюции нашей Вселенной за время порядка 10—20 млрд лет.

В случае открытой модели Вселенной, когда отношение плотности вещества во Вселенной к критической плотности $\varrho/\varrho_{кр} \leqslant 0.1$, полный возраст Вселенной в нашу эпоху $t_0 = H_0^{-1} \simeq 20$ млрд. лет, а в эпоху при $z = 3$ Вселенная была в четыре раза моложе, поскольку $t = t_0(1+z)^{-1}$. Если же $\rho/\rho_{кр} = 1.0$, полный возраст Вселенной будет меньше, $t_0 = {}^2/_3 H_0^{-1} \simeq 14$ млрд. лет, но в эпоху при $z = 3$ Вселенная была в 8 раз моложе, чем сейчас, т. к. $t = t_0\,(1+z)^{-3/2}$.

Эмиссионные спектры квазаров

Главная отличительная черта квазара — это его оптический спектр, содержащий линии с большим красным смещением. Как же выглядит такой спектр?

На рис. 1 представлен типичный оптический спектр одного из наиболее далеких квазаров, а именно квазара ОН 471. Видно, что имеется континуальное излучение, на которое накладывается несколько очень мощных эмиссионных линий. Самая мощная из них — это линия атомарного водорода H*I* *Ly*-α, но, кроме нее, наблюдается и ряд других, относящихся к высоко ионизированным атомам N*V*, O*VI* и др. Эмиссионные линии очень широкие, 50—100 Å и более, что соответствует движению газа в ядре квазара со скоростями $v = 5000—10\,000$ км/с. Спектр, представленный на рис. 1, был получен с разрешением 30 Å Карсуэллом с сотрудниками на 3-метровом телескопе Ликской обсерватории [1].

На рис. 2 представлен фрагмент спектра того же квазара, ОН 471, полученный В. Б. Небелицким и др. на 6-метровом телескопе САО АН СССР [2]. Этот спектр снят с разрешением ~ 2 Å, весьма высоким для таких слабых объектов. В спектре видна та же сильная эмиссионная линия с $\lambda = 5350$ Å, соответствующая линии *Ly*-α с $\lambda_0 = 1216$ Å, т. е. эта линия из области далекого ультрафиолета сместилась в видимый диапазон длин волн. Отметим, что это один из первых абсорбционных спектров квазаров, полученных в Советском Союзе. До сих пор спектры квазаров с таким разрешением в нашей стране не снимались.

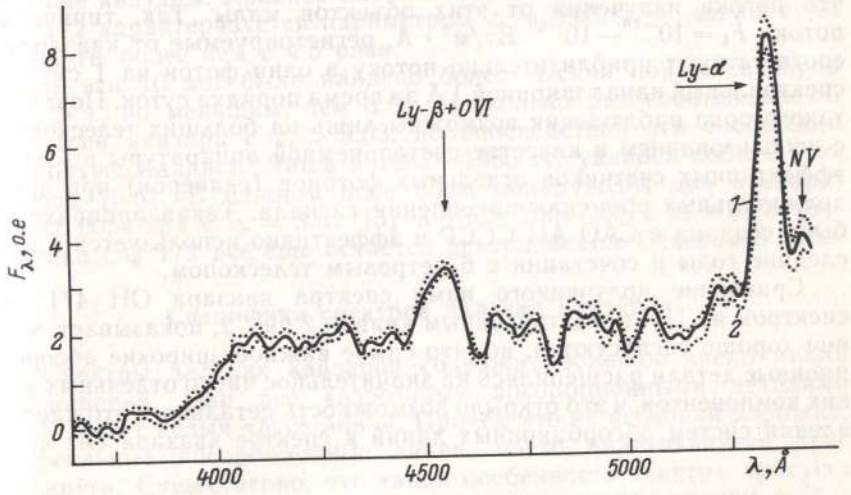


Рис. 1. Спектр квазара ОН 471 (*1*) и статистическая ошибка (*2*) в спектре на уровне 3σ [1].

λ — длина волн в Å; F_λ — измеренные потоки в о. е. *Стрелками* отмечены эмиссионные линии: *Ly*-α ($\lambda_0 = 1216$ Å), *Ly*-β ($\lambda_0 = 1026$ Å) и O VI ($\lambda_0 = 1035$ Å), N V ($\lambda_0 = 1240$ Å).

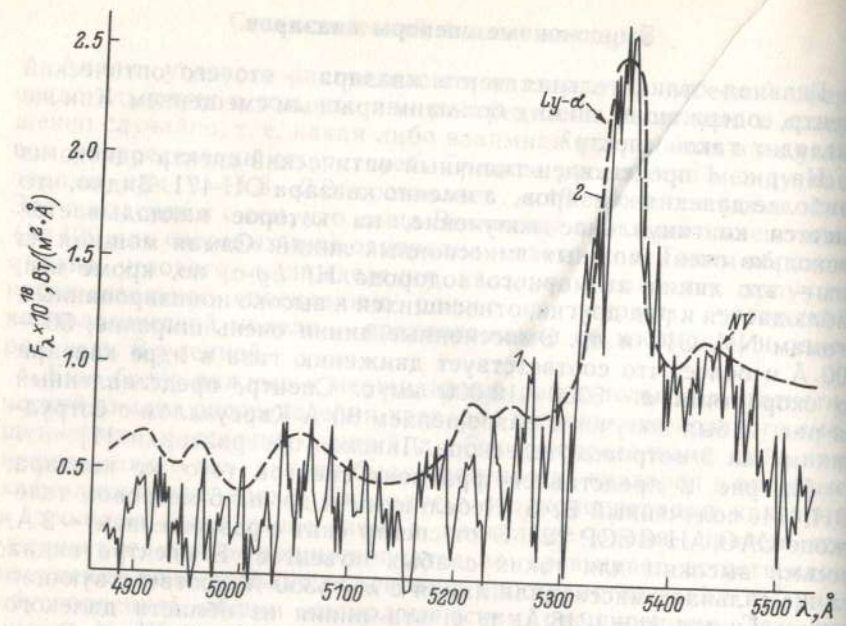


Рис. 2. Фрагменты спектров квазара ОН 471.

1 — из работы [2]; *2* — из работы [1]. *Стрелками* отмечены эмиссионные линии *Ly-α* ($\lambda_0 = 1216$ Å) и N V ($\lambda_0 = 1240$ Å).

В чем же трудности этой задачи? Основная трудность спектроскопии высокого разрешения далеких квазаров заключается в том, что потоки излучения от этих объектов малы. Так, типичные потоки $F_\lambda = 10^{-18}$—10^{-20} Вт/м² · Å, регистрируемые от квазаров, соответствуют приблизительно потоку в один фотон на 1 см² на спектральный канал шириной 1 Å за время порядка суток. Поэтому такого рода наблюдения возможны лишь на больших телескопах с использованием в качестве светоприемной аппаратуры высокоэффективных счетчиков отдельных фотонов (сканеров) при продолжительных временах накопления сигнала. Такая аппаратура была создана в САО АН СССР и эффективно используется в последние годы в сочетании с 6-метровым телескопом.

Сравнение полученного нами спектра квазара ОН 471 со спектром из [1], представленным кривой *2* рис. 2, показывает, что они хорошо согласуются, но, что самое важное, широкие абсорбционные детали расщепились на значительное число отдельных узких компонентов, и это открыло возможность детального отождествления систем абсорбционных линий в спектре квазара ОН 471.

Квазар OQ 172 — самый далекий объект Северного неба

На рис. 3 представлен полученный В. Б. Небелицким с сотрудниками фрагмент спектра одного из наиболее замечательных

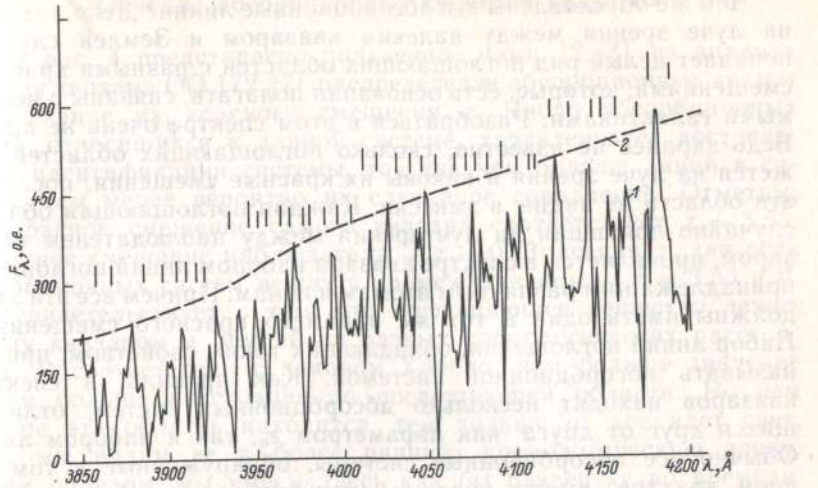


Рис. 3. Фрагмент спектра квазара OQ 172 (*1*) и предполагаемый уровень континуума (*2*) [3].

Вертикальными черточками отмечены абсорбционные детали.

квазаров, OQ 172, снятый с таким же разрешением, ~2 Å на 6-метровом телескопе [3]. Этот квазар был открыт еще в 1973 г. [4] и в течение 10 лет являлся самым далеким из всех известных объектов, несмотря на многочисленные попытки открыть более далекие квазары. Красное смещение эмиссионных линий квазара OQ 172 характеризуется параметром $z_e = 3.53$, т. е. длины волн сдвинуты более чем в 4.5 раза.

За эти 10 лет было найдено более тысячи новых квазаров с $z_e > 1$, но меньшим, чем 3.53. Несколько раз сообщалось об открытии квазара с $z_e > 3.53$, но впоследствии эти сообщения не подтверждались. Лишь в 1982—1983 гг. удалось побить этот рекорд [5.6]. В Южном небе были обнаружены два квазара: DHM 0054-284 с $z_e = 3.61$ [5] и PKS 2000-330 с $z_e = 3.78$ [6]. Однако OQ 172 все еще остается рекордсменом Северного неба.

Специфика спектров далеких квазаров

Спектры далеких квазаров содержат большое число линий поглощения. Они все «изрезаны» абсорбционными деталями и содержат целый «лес» линий. Причем это не шумовая дорожка, а реальные абсорбционные линии, часто налагающиеся друг на друга. Существенно, что такая особенность спектра присуща только далеким квазарам с большим красным смещением $z_e \gtrsim 1$. В спектрах близких квазаров этого нет. Но такая специфика спектров выявляется лишь при достаточно высоком спектральном разрешении.

Чем же обусловлены эти абсорбционные линии? Дело в том, что на луче зрения между далеким квазаром и Землей случайно попадает целый ряд поглощающих областей с разными красными смещениями, которые, есть основания полагать, связаны с невидимыми галактиками. Разобраться в этом спектре очень не просто. Ведь заранее не известно, сколько поглощающих областей окажется на луче зрения и каковы их красные смещения, поскольку эти области не видны в эмиссии. Каждая поглощающая область, случайно попавшая на луч зрения между наблюдателем и квазаром, проявляется в спектре квазара набором линий поглощения, принадлежащим различным атомам и ионам. Причем все эти линии должны иметь один и тот же параметр красного смещения z_a. Набор линий поглощения, обладающих таким свойством, принято называть абсорбционной системой. Как правило, в спектрах квазаров находят несколько абсорбционных систем, отличающихся друг от друга как параметром z_a, так и набором линий. Обычно все абсорбционные системы, обнаруженные в том или ином квазаре, имеют красные смещения $z_a \leqslant z_e$. Хотя имеется несколько случаев, когда параметр области поглощения z_a чуть больше z_e. Такое соотношение могло бы существовать, если бы галактика и квазар, входящие в одно и то же далекое скопление, двигались навстречу друг другу, но мы опять-таки наблюдаем эффект проекции этой галактики на квазар.

Абсорбционные линии в спектре квазара отождествляют путем сканирования заранее заданного набора лабораторных длин волн атомов и ионов по спектру квазара. Такую операцию можно делать, например, вычисляя для каждой лабораторной линии λ_0 ее сдвинутую длину волны $\lambda = \lambda_0(1+z_a)$ и проверяя, совпадает ли эта вновь вычисленная λ с какой-либо линией из наблюдаемого спектра, а затем, меняя параметр z_a, повторять процедуру заново. При этом из-за большого числа абсорбционных деталей (100—200 на 1000 Å при разрешении 1—2 Å) в спектрах далеких квазаров затруднено их отождествление, поскольку велика вероятность случайного совпадения длин волн. Поэтому для каждой абсорбционной системы необходимо оценивать ее статистическую достоверность, принимая во внимание не только совпадение длин волн и число отождествленных линий, но и их относительные интенсивности для каждого атома и иона, относительное содержание различных элементов, взаимную согласованность степеней ионизации и возбуждения и др. Была разработана специальная нетривиальная методика отождествления линий поглощения и поиска абсорбционных систем [2]. Не будем описывать ее в деталях, отметим лишь, что ключевым моментом в этой методике было использование в качестве опорного поискового спектра УФ-линии межзвездного поглощения нашей Галактики, ее гало, а также ряда соседних галактик, наблюдавшихся с борта американской орбитальной астрономической обсерватории «Коперник».

Изучение абсорбционных спектров квазаров

На рис. 4 представлено полученное нами [2, 3] из анализа спектра квазара OQ 172 [7] распределение абсорбционных систем по величине их красного смещения z. Число абсорбционных линий, относящихся к данной системе, характеризует достоверность идентификации системы, так как чем больше линий в системе, тем менее вероятно их случайное совпадение. Отметим, что красное смещение самого квазара соответствует $z = 3.53$, а красное смещение наблюдателя — $z = 0$. Значения z_a для всех абсорбционных систем лежат в промежутке между $z = 3.53$ и 0. Это свидетельствует о том, что поглощающее вещество лежит между квазаром и Землей на разных космологических расстояниях. В соответствии с законом Хаббла, чем больше значение z, тем больше расстояние до поглощающей области. Но чем дальше эта область находится, тем дольше от нее идет свет, т. е. мы видим ее в более раннюю космологическую эпоху. Таким образом, мы имеем здесь как бы развертку во времени. В этом и заключается основное достоинство такого метода. Каждому значению красного смещения z соответствует своя космологическая эпоха, свое время t. Поэтому на рис. 4 дополнительно

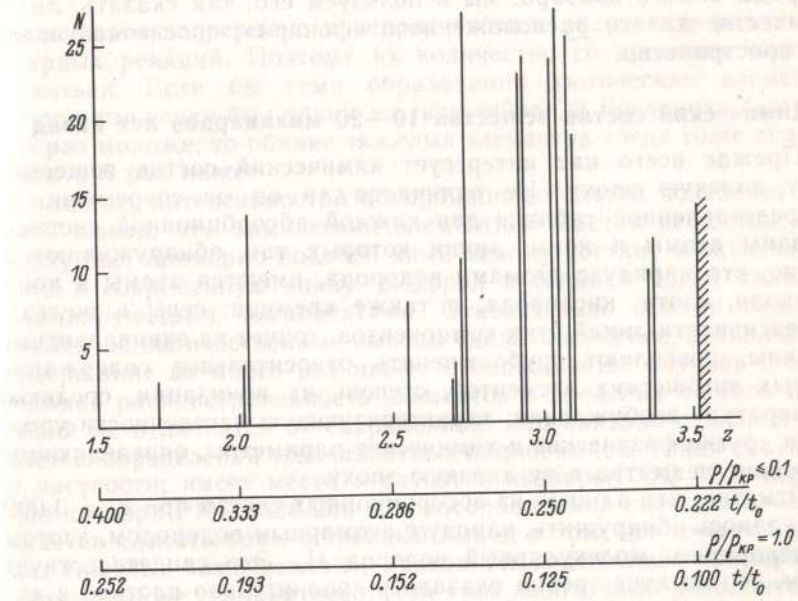


Рис. 4. Распределение абсорбционных систем и космологический возраст Вселенной t.

z — величина красного смещения линий; N — число линий, соответствующих данной абсорбционной системе; t_0 — современный возраст Вселенной для двух случаев: $\varrho/\varrho_{кр} \leqslant 0.1$ и $\varrho/\varrho_{кр} = 1.0$.

параллельно оси z даны шкалы времени. При малых значениях $z<1$ время t, отсчитываемое от нашей эпохи в прошлое, прямо пропорционально z, т. е. $t=\frac{1}{H_0}z$. Но при больших значениях $z>1$, когда рассматриваемый промежуток времени соизмерим с космологическим временем, необходимо учитывать замедление общего расширения. Поэтому связь z и t определяется уже не одной, а двумя фундаментальными постоянными H_0 и q_0, где q_0 — безразмерный параметр замедления, равный половине отношения средней плотности вещества во Вселенной к критической плотности, $q_0=\frac{1}{2}\varrho/\varrho_{кр}$. Значение отношения $\varrho/\varrho_{кр}$ пока еще точно не известно. Поэтому на рис. 4 приведены две шкалы времени для значения $\varrho/\varrho_{кр}=0.1$ и для $\varrho/\varrho_{кр}=1.0$.

Итак, мы получили уникальную возможность исследовать нашу Вселенную в далеком прошлом, изучить химический состав вещества и физические условия, имевшие место 10^9—10^{10} лет назад, определить характеристики существовавших тогда галактик, а возможно, и протогалактик, выяснить их пространственное распределение. Подчеркнем еще раз, что эти галактики или протогалактики не видны ни в какой телескоп, так что иных способов их изучения нет. При этом не существенно, что мы еще не знаем природы самого квазара, мы используем его, так сказать, лишь в качестве далеко расположенного «фонаря», просвечивающего все пространство.

Химический состав вещества 10—20 миллиардов лет назад

Прежде всего нас интересует химический состав вещества в ту далекую эпоху. Не отличался ли он от современного? В представленной таблице для каждой абсорбционной системы указаны атомы и ионы, линии которых там обнаруживаются. Видно, что наряду с атомами водорода, имеются атомы и ионы углерода, азота, кислорода, а также кремния, серы и железа. Интенсивности линий этих компонентов, точнее их эквивалентные ширины, позволяют грубо оценить относительное содержание разных химических элементов, степень их ионизации, среднюю температуру возбуждения, характеризующую населенности уровней и другие физические и химические параметры, определяющие состояние вещества в ту далекую эпоху.

Отметим, что в одной из абсорбционных систем при $z_a=3.092$ нам удалось обнаружить, наряду с атомарным водородом, азотом и кислородом, молекулярный водород H_2. Это свидетельствует о том, что на луче зрения оказалось сравнительно плотное и холодное газовое облако. Существование молекулярных облаков в такую раннюю космологическую эпоху рассматривается в работе [8].

Согласно общепринятой теории происхождения химических элементов, атомные ядра C, N, O и др., в отличие от H и He,

Абсорбционные системы в спектре OQ 172

Красное смещение линий z_a	Число отождествленных линий, N	Атомы и ионы (и молекулы), линии которых обнаружены в данной системе
1.7352	3	H I, C IV
2.0692	4	H I, C II, C IV
2.0750	14	H I, C I, C II, C IV, N II, O I, Al II, Si II, Si IV
2.5646	8	H I, C II, C IV, N III, Fe II
2.6922	3	H I, N II
2.6982	4	H I, N II, Fe III
2.7280	11	H I, C I, C II, N II, Si II, Si III
2.7402	27	H I, C I, C II, C III, N I, N II, O I, O VI, Al II, Si II, Si IV, S II, S III, Fe II
2.9317	23	H I, C II, N V, O I, O VI, Si II, Si III, Si IV, S II
2.9395	24	H I, C I, C II, C IV, N II, N III, N V, O I, O VI
3.0463	24	H I, C I, C II, C III, C IV, N I, N III, O I, O VI
3.0668	27	H I, C II, N I, N II, O I, Si II, S III
3.0910	25	H I, N I, O I, H_2
3.0936	19	H I, C II, C III, N II, Si II, S II, S III, FeIII
3.3498	10	H I, C II, N III, N V, Si II, Si III, S IV
3.3527	12	H I, C I, N I, O I

образуются непрерывно в недрах звезд в результате различных ядерных реакций. Поэтому их количество со временем должно меняться. Если бы темп образования химических элементов в прошлые эпохи был таким же, как сейчас, а Вселенная была бы в 5 раз моложе, то обилие тяжелых элементов тогда тоже должно быть в 5 раз ниже.

Анализ интенсивностей абсорбционных линий позволяет сделать вывод, что химический элементный состав вещества в ту эпоху был примерно подобен химическому составу межзвездного газа в современную эпоху. Водород и гелий и тогда являлись доминирующими компонентами. Относительно обилия тяжелых элементов количественные выводы сделать сложнее, поскольку их содержание во много раз ниже. В большинстве случаев относительная распространенность элементов в пределах ошибок измерений не отличается от современной. Это связано с низкой точностью определения эквивалентных ширин линий. Такая ситуация, в частности, имеет место в случае с квазаром OQ 172. Однако для квазара PKS 0528-250 для абсорбционной системы $z_a=2.811$ удается сделать количественный вывод о том, что имеется дефицит тяжелых химических элементов. Их содержание примерно на порядок ниже стандартного. При этом необходимо дополнительно показать, что эти элементы не конденсировались в твердую фазу, в пыль [9, 10].

Для более определенного количественного вывода по одной из важнейших проблем — проблеме происхождения элементов и космологической эволюции химического состава вещества —

нужны более точные измерения спектров большого числа далеких квазаров с высоким разрешением.

Какова была Вселенная 10—20 миллиардов лет назад?

В прошлом, как и в нашу эпоху, распределение галактик в пространстве было неоднородным в малом масштабе. Это непосредственно видно из рис. 4. В распределении галактик по z имеются «дыры» и видны сгущения — по-видимому, скопления галактик; часто встречаются пары близких по z галактик. При $z = 3.074$, судя по рис. 4, имеется богатое скопление галактик. Дисперсия скоростей галактик в этом скоплении $\sigma_v \simeq 1000$ км/с, а концентрация галактик в нем, по крайней мере, на порядок превышает среднюю концентрацию местной группы галактик. Вероятно, здесь мы видим наиболее далекое из всех известных скоплений галактик.

Рассматривая распределение галактик, усредненное по достаточно большому интервалу, $\Delta z = 1$, т. е. анализируя крупномасштабное распределение вещества, можно сделать следующее заключение. С ростом z число абсорбционных систем, приходящееся на единичный интервал Δz, монотонно и довольно быстро возрастает. Это обусловлено двумя обстоятельствами: во-первых, в ту раннюю эпоху средние размеры галактик были больше современных; во-вторых, концентрация галактик была значительно выше, чем в настоящее время. Первое обстоятельство связано с эволюцией самих галактик, с их релаксацией, с постепенным истощением газовой составляющей. Второе обстоятельство эквивалентно тому, что в результате общего космологического расширения, т. е. разбегания галактик друг от друга, их концентрация со временем падает. Тем самым мы получаем новое подтверждение справедливости космологической модели расширяющейся Вселенной — увеличение концентрации галактик с ростом z.

Более того, сравнивая средние концентрации галактик в эпохи $z = 3$ и $z = 1$, точнее, среднее число абсорбционных систем, приходящихся на единичный интервал Δz, в принципе можно оценить отклонение от простого линейного закона Хаббла, определяющего расширение Вселенной при малых значениях $z < 1$. Отсюда мы можем выявить замедление космологического расширения, обусловленное самогравитацией вещества. Другими словами, мы можем таким путем оценить темп замедления расширения, который, согласно космологической модели, определяется отношением средней плотности вещества во Вселенной к критической плотности $\rho_{кр} \simeq 10^{-30}$ г/см^3. Это отношение — один из основных параметров космологии. Если средняя плотность вещества выше критической, $\rho/\rho_{кр} > 1$, то вследствие гравитационного притяжения общее разбегание галактик, т. е. расширение мира, через сотни миллиардов лет сменится сжатием. Если же средняя плотность меньше или равна критической, то расширение мира будет неограниченным.

Итак, результаты исследования распределения абсорбционных систем по Z в принципе дают возможность оценить величину этого фундаментального космологического параметра и тем самым позволяют решить проблему о будущем нашей Вселенной. Однако для хорошего статистического обоснования этого важного вывода необходимо проанализировать спектры большого числа квазаров, полученных с высоким спектральным разрешением и высокой фотометрической точностью. В этом состоит наша программа на будущее, и мы надеемся ее реализовать.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Carswell R. F., Strittmatter P. A.* Redshift of OH 471. — Nature, 1973, **242**, N 5397, p. 394—395.
2. *Небелицкий В. Б., Варшалович Д. А., Левшаков С. А., Фоменко А. Ф.* Спектральные наблюдения квазаров. — Опт. и спектр., 1983, **54**, № 5, с. 763—765.
3. *Небелицкий В. Б., Фоменко А. Ф., Левшаков С. А., Варшалович Д. А.* Спектральные наблюдения квазара *OQ* 172. — Письма в Астрон. журнал, 1984, **10**, № 2, с. 83—89.
4. *Wampler E. J., Robinson L. B., Boldwin J. A., Burbidge E. M.* Redshift of OQ 172. — Nature, 1973, **243**, N 5406, p. 336—337.
5. *Shanks T., Fong R., Boyle B.* Discovery of DHM 0054—284, a quasar of redshift 3, 61. — Nature, 1983, **303**, N 5913, p. 156—158.
6. *Peterson B. A., Savage A., Jauncey D. L., Wright A. E.* PKS 2000—330: a quasi—stellar radio source with a redshift of 3.78. — Astrophys. J. Lett., 1982, **260**, N 2, p. L27—L29.
7. *Baldwin J. A., Burbidge E. M., Burbidge G. R. a. o.* An analysis of the spectrum of the large-redshift quasi-stellar object OQ 172. — Astrophys. J., 1974, **193**, N 3, p. 513—523.
8. *Varshalovich D. A., Levshakov S. A.* High-redshift molecular clouds and absorption-line spectra of quasars. — Comments Astrophys., 1982, **9**, N 5, p. 199—209.
9. *Morton D. C., Chen Jian-Sheng, Wright A. E. a. o.* Absorption lines and ion abundances in the QSO PKS 0528—250. — Mon. Not. R. astr. Soc., 1980, **193**, N 2, p. 399—413.
10. *Levshakov S. A., Varshalovich D. A.* Molecular hydrogen in the $z = 2.811$ absorbing material toward the quasar PKS 0528—250. — Mon. Not. R. astr. Soc., 1985, **212**, N 3, p. 517—521.

Л. Э. Гуревич

СОВРЕМЕННАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Современная космическая физика, т. е. наука о Вселенной, вплотную подошла к проблемам, о которых прежде размышляли лишь философы, — к проблемам соотношений пространства, времени и материи. Создаваемая ею картина Вселенной не только материалистична, но и содержит существенные элементы диалектики. Все объекты, которыми она занимается, — от целой Вселенной до отдельной звезды — изменяются со временем, проходят различные пути эволюции.

Основную роль во Вселенной играет всемирное тяготение, или гравитация, управляющая движениями небесных тел. Эта сила

стремится сжать все тела, объединив их в единое тело. Однако, наряду с этой тенденцией к объединению, существует противоположное явление — расширение Вселенной, причина которого еще далека от полного объяснения. Вследствие взаимодействия этих двух противоположных явлений вещество Вселенной образовало звезды, галактики и скопления галактик, а также планеты. Такое наличие противодействующих сил существует и в отдельных звездах, и с особой силой оно проявляется у массивных звезд. Эти звезды постепенно сжимаются в ходе своей эволюции под влиянием самогравитации, но в конце концов разлетаются при так называемых вспышках сверхновых под влиянием внутренних сил давления либо превращаются в нейтронную звезду гораздо меньшей массы.

Современная космическая физика радикально изменила представления о пространстве и времени. Начнем с примера, наглядно иллюстрирующего изменение представления о времени.

В XIX в. существовала уверенность в том, что время «несет» все события одинаковым темпом. В начале XX в. это представление существенно изменилось. Чтобы понять это наиболее просто, представим себе космонавта, летящего в космическом пространстве со скоростью 100 тыс. км/с (далеко превосходящей достижимую в настоящее время) на расстоянии от Солнца, примерно равном радиусу земной орбиты. Вернувшись на Землю после полета в течение года, он окажется моложе своих оставшихся на Земле сверстников примерно на два месяца. Это не противоречит принципу относительности, так как если космонавт вернулся обратно на Землю, то, следовательно, в течение своего путешествия он двигался с ускорением, тогда как принцип относительности применим только к инерциальным, т. е. равномерным и прямолинейным движениям. Чем быстрее происходит его полет, тем больше он за это время отстанет от сверстников. Однако ни при какой скорости он не сможет помолодеть. От «потока» времени можно отстать, но движение в прошлое невозможно.

Современная астрофизика предполагает существование небесных объектов, называемых черными дырами. Тело, падающее извне на черную дыру, подлетает к ее поверхности со скоростью, почти равной скорости света. При этом течение времени на этом теле очень сильно замедляется по сравнению с течением времени отдаленных объектов. Так что по часам таких объектов это тело «почти застывает» на месте. Однако как в космическом корабле нашего космонавта, так и на теле, подлетевшем к черной дыре, все процессы, например физиологические процессы, химические реакции и другие, идут с нормальной скоростью, соответствующей течению их времени. Когда тело попадает внутрь черной дыры, то оно уже не движется внутри ее в пространстве. Можно сказать, что время несет его в будущее, а так как возвращение из будущего в прошлое невозможно, то невозможен и обратный выход из черной дыры. Этим и объясняется ее название.

В современной космической физике возникло принципиально новое представление о пространстве и времени, связанное с созданием общей теории относительности (ОТО) А. Эйнштейном.

Мы видели сейчас, что, согласно новым представлениям, «поток» времени может нести события с различной скоростью в разных местах пространства и в ускоренно движущихся телах. Аналогичным образом усложнилось и представление о свойствах пространства. Теперь мы знаем, что пространство не эвклидово (например, квадрат гипотенузы прямоугольного треугольника не равен сумме квадратов его катетов). Отклонение пространства от эвклидова определяется гравитацией, создаваемой материей. То, что со времен Ньютона считалось силой всемирного тяготения, или гравитацией, представляет собой в действительности проявление неэвклидовых свойств пространства. Именно эти свойства заставляют тело двигаться по криволинейной траектории или с ускорением; так объясняется, например, движение планет вокруг Солнца.

Отклонения свойств пространства от эвклидовых создаются материей, заполняющей пространство; при этом существенна плотность материй и энергия ее движения. Так как пространство в астрономических масштабах приблизительно равномерно заполнено материей — звездами, галактиками и их скоплениями, то и создаваемое материей гравитационное поле, т. е. неэвклидовы свойства пространства имеют место практически во всей Вселенной.

Это изменение представления о пространстве и времени имеет принципиальное значение. Прежде считали, что мир состоит из трех независимых реальностей: материи, пространства и времени; пространство всегда эвклидово, а время, как уже сказано, течет равномерно и одинаково во всем пространстве. Научная революция начала XX в. опровергла эти представления. Оказалось, что пространство и время не являются абсолютными и неизменными; их свойства определяются распределением и движением материи. Но в свою очередь измененные таким образом пространство и время действуют на материальные тела как силы, создающие их ускорения.

Как уже сказано, Вселенной управляет и создает ее структуру сила тяготения, или гравитация. Основное утверждение ОТО заключается в том, что гравитация не есть сила того же типа, что и электрическая сила, и в действительности она представляет собой проявление неэвклидовой структуры пространства и неньютоновых свойств времени. Известно, что впервые представление о неэвклидовом пространстве создали Н. И. Лобачевский и независимо от него Больяи. Позднее это представление было значительно расширено и обобщено Риманом, и в ОТО предполагается именно риманова структура пространства. Г. Минковский показал, что в новой физике пространство и время представляют собой четырехмерное единство, с которым наука с этого времени и имеет дело. Поэтому реальность обладает римановой структурой,

и теперь ее надо называть пространство—время. Таким образом, ОТО принципиально изменила прежнее представление о трех независимых реальностях.

Космология довольно убедительно доказала существование в истории Вселенной эпохи, когда материя была очень плотной и очень горячей. От этой эпохи осталось так называемое реликтовое излучение, равномерно распределенное в пространстве.

Первоначально плотное и горячее вещество Вселенной расширилось в процессе ее эволюции, и это расширение продолжается до сих пор. Впервые «теория расширяющейся Вселенной» была создана А. А. Фридманом в 1922 г.; на опыте она была подтверждена через несколько лет Хабблом.

Современная астрофизика обладает приборами, дающими возможность «заглянуть» в прошлое Вселенной на миллионы и даже миллиарды лет. Так, в работе группы Д. А. Варшаловича, выполненной в Ленинградском физико-техническом институте и в специальной астрофизической обсерватории в Зеленчуке, было непосредственно показано, что в далекую эпоху вещество Вселенной имело гораздо большую плотность, чем в наше время. Но если доказано расширение Вселенной со временем, то при переходе в обратном направлении времени, т. е. в прошлое, должен быть достигнут предел возможного уплотнения. Эта эпоха наибольшей плотности связана с процессом возникновения нашей Вселенной. Как и в каких условиях она возникла, представляет собой одну из самых трудных проблем современной космической физики. В настоящее время эта проблема еще далека от решения.

Современная космическая физика способна решать целый ряд вопросов о свойствах Вселенной в целом. Мы остановимся на проблеме конечности или бесконечности Вселенной. Хотя в настоящее время еще не выяснена полностью природа того первичного «толчка», который заставил Вселенную расширяться, однако наблюдения установили скорость этого расширения. Расширению препятствует гравитация вещества Вселенной, стремящаяся его остановить. Судьба Вселенной зависит от соотношения этих двух тенденций. В пределах той части Вселенной, которая доступна исследованию, вещество в больших масштабах распределено, как уже сказано, приблизительно равномерно, и судьба Вселенной зависит от его средней плотности. До недавнего времени эта средняя плотность определялась посредством оценки суммарной массы звезд, межзвездного газа и энергии реликтового излучения. И эта оценка приводила к выводу, что суммарная плотность материи, по крайней мере, на порядок меньше той критической плотности, при которой гравитация может остановить расширение.

В 1981 г. группа В. А. Любимова в Москве выполнила очень искусный эксперимент, приведший к выводу о том, что средняя плотность материи во Вселенной больше критической. Дело в том, что в физике были известны элементарные частицы, испускаемые атомными ядрами при так называемом радиоактивном бета-распаде. Эти частицы носят название нейтрино. До опыта

В. А. Любимова физики были убеждены в том, что нейтрино, так же как и фотоны, не имеют массы покоя. Указанные опыты показали, что это убеждение, по-видимому, неверно и что нейтрино имеет массу покоя примерно в двадцать тысяч раз меньшую, чем масса электрона. Однако количество нейтрино во Вселенной, по крайней мере, на девять порядков превышает количество простейших ядерных частиц — протонов (и электронов), и потому суммарная масса нейтрино на порядок превышает массу всех остальных частиц. Хотя эксперимент В. А. Любимова и вызвал некоторые сомнения и его результат еще нельзя считать окончательно установленным, тем не менее удивителен сам факт, что судьба Вселенной может быть предсказана наукой непосредственно при помощи эксперимента над элементарными частицами.

Если нейтрино имеют массу покоя, то расширение Вселенной должно рано или поздно прекратиться. Однако этот вывод не исчерпывает полностью значение этого предсказания. На языке ОТО, т. е. на языке римановой геометрии пространства—времени, этот вывод имеет и иной, совершенно отличный аспект — если нейтрино имеют массу покоя, пространство нашей Вселенной ограничено. В противном случае пространство Вселенной неограничено, т. е. имеет бесконечную протяженность.

Означает ли ограниченность пространства нашей Вселенной, что весь мир конечен? Сейчас этого уже нельзя утверждать. Мы живем в пространстве трех измерений (или в четырехмерном пространстве—времени). Какова причина этой трехмерности? Каков смысл цифры «три»? На этот вопрос мы также можем ответить. Рядом ученых показано [1, 2, 4], что возникновение жизни возможно лишь в трехмерном пространстве. Но если так, то возможно, что в бесконечном мире существуют вселенные, пространства которых имеют более трех измерений, со сложными формами материи (галактики, звезды, планеты, живые организмы), движение которой описывается иными физическими законами. Наука далека от решения этой проблемы, но важно, что она сформулирована, и нет сомнения, что она будет решена. Не исключено, что в одной из тех вселенных, в которой существуют звезды галактики и жизнь, имеются и разумные существа, подобные нам, людям, живущим в трехмерной Вселенной на планете Земля. Не будет слишком смело сказать, что не исключена также возможность для нас проникнуть в будущем в одну из таких вселенных.

В этом небольшом очерке я стремился показать, как революционизировалось наше представление об окружающем мире. Современные знания о нем содержат и его теперешнее строение и его историю. Мир есть реальность, развивающаяся диалектически.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ehrenfest P.* In what way does it become manifest in the fundamental laws of physics that space has three dimensions? — Proc. Amsterd. Acad., 1917, **20**,

p. 200—209. Перев.: *Горелик Г. Е.* Размерность пространства. М.: МГУ, 1983, с. 197—205.
2. *Gurevich L., Mostepanenko V.* On the existence of atoms in n-dimensional space. — Phys. Lett., 1971, **A35**, p. 201—202.
3. *Вайнберг С.* Первые три минуты. М.: Энергоиздат, 1981.
4. *Горелик Г. Е.* Почему пространство трехмерно? М.: Наука, 1982.

В. Ф. Левченко, Я. И. Старобогатов

ДВА АСПЕКТА ЭВОЛЮЦИИ ЖИЗНИ: ФИЗИЧЕСКИЙ И БИОЛОГИЧЕСКИЙ

Первоначально очертим круг вопросов, рассмотрению которых посвящена данная работа.

Какими факторами обусловлена биологическая эволюция и всегда ли она приводит к биологическому прогрессу? С тех пор как Дарвиным был сформулирован принцип естественного отбора, на эти вопросы не раз пытались ответить. Однако, если широкий круг явлений эволюции и описывается в рамках дарвинизма, то в отношении прогресса каких-либо убедительных решений до сих пор не существует. И дело здесь не в недостатках представлений Дарвина, а в том, что он ставил вопрос в иной плоскости и говорил о «выживаемости наиболее приспособленных», не вкладывая в понятие приспособленности того оттенка «прогрессивности», который привнесли более поздние исследователи.

Попробуем разобраться, действительно ли только конкуренция и отбор, о которых говорил Дарвин, оказывают влияние на эволюционные изменения. Для того чтобы ответить на этот вопрос, обратим внимание на то, что ни один из организмов, ни один из видов не существует сам по себе и вне других. Все организмы включены в те или иные экосистемы, взаимодействуют между собой и используют факторы внешней к ним среды, предоставляемые им организмами других видов. Значит, изучать эволюцию можно только путем рассмотрения всего биологического окружения организмов и «связей по существованию» между ними. По сути следует говорить об эволюционирующих экологических конструкциях, в которых разные популяции способствуют существованию друг друга, находясь в отношениях, сходных с симбиотическими. И только на «фундаменте» экологического симбиоза разворачивается конкуренция.

Можно выделить разные уровни симбиотических (в обобщенном смысле) конструкций. Симбиотическими являются биогеосфера, отдельные экосистемы разных рангов, а также и отдельные организмы (например, каждая клетка, каждый орган, используя внутреннюю среду организма, сами необходимы для его существования). Имеются ли какие-нибудь общие черты в плане взаимодействия упомянутых конструкций со средой? Оказывается, такие общие черты есть и определяются они стремлением симбиотических систем к поддержанию внутри себя определенного, необходимого для их функционирования уровня упорядоченности. Если же это

им не удается — происходит дезорганизация и распад (гибель) системы. Не следует, конечно, вкладывать в слово «стремление» тот обыденный смысл, который характеризует поведение человека или животных. Говоря о нем, мы констатируем лишь тот факт, что в процессе эволюции сохраняются только такие биосистемы, которые способны к поддержанию внутренней упорядоченности.

Из физики хорошо известно, что для поддержания определенного уровня упорядоченности, или, другими словами, пониженного уровня энтропии, необходимо, чтобы в систему постоянно или периодически поступал поток энергии или, что здесь эквивалентно, низкоэнтропийного вещества из среды. О приложении этого утверждения к жизненным явлениям писал Э. Шредингер в своей книге «Что такое жизнь?». Для того чтобы в случае уменьшения энергетического потока через среду поток энергии, извлекаемой из среды биосистемой, тем не менее не уменьшался и она «выживала», необходимо, чтобы она в этих обстоятельствах «умела» бы находить новые нетрадиционные для нее источники энергии. В рамках такого подхода можно предложить механизм функционирования симбиотических биосистем, в идеальном случае заключающийся в том, что при врéменном выключении традиционных энергетических каналов они стараются приспособиться к новым условиям, ищут и находят (путем проб и ошибок, или, иначе, «эксперимента» и последующего отбора) новые каналы или же более эффективно используют старые. Обычные организмы, как правило, не используют все имеющиеся и найденные каналы поступления энергии в дальнейшем, хотя и запоминают необходимые для этого операции. Это обусловлено выработанными в процессе биологической эволюции ограничениями на величину энергетического потока, проходящего через них. Экосистемы же и биогеосфера не имеют таких ограничений и после указанных «прерываний» (о причине их сказано ниже) способны использовать за единицу времени большее количество энергии. Последнее связано с тем, что при прерываниях преимущество в отборе начинают иметь виды, более эффективно использующие энергию из среды. Строгое обоснование последних утверждений требует детального рассмотрения процессов изменения экологических ниш популяций.

Поскольку экосистемы и биогеосфера используют для своего существования главным образом энергию Солнца, то каждое прерывание приводит к возрастанию продуктивности фотосинтеза, а следовательно, к возрастанию производства органического вещества. Происходит это как результат отбора и появления соответствующих видов растений. На ранних этапах эволюции упомянутые процессы происходили за счет увеличения эффективности химических сторон процесса фотосинтеза, на поздних, т. е. в последние 550 млн. лет, начиная с кембрия, — за счет увеличения площади фотосинтезирующей поверхности, по сути за счет появления видов с возросшей площадью и количеством листьев или других фотосинтезирующих образований. Для того чтобы проде-

монстрировать, насколько велико значение указанных факторов, достаточно сказать, что, начиная с кембрия, эффективность использования потока солнечной энергии наземными продуцентами возросла в $\sim 10^2$ раз.

Несомненно, что увеличение потока энергии через единицу площади биогеосферы, влекущее за собой возрастание производства органического вещества, приводит к понижению уровня ее энтропии и усложнению особенностей структуры — росту упорядоченности в глобальном масштабе. Собственно, это и влечет за собой прогрессивную эволюцию некоторых видов, вынужденных выполнять в биогеосфере все более и более сложные (утонченные) функции. Все атрибуты биологической эволюции, обусловленные конкурентной борьбой и отбором, могли бы наблюдаться и в том случае, если бы поток энергии не менялся, однако при этом эволюция была бы нефинальна, т. е. напоминала бы ситуацию смены людей (видов) в учреждении (биогеосфере) с одним и тем же замороженным штатным расписанием. Данный подход снимает остроту проблемы биологического прогресса, поскольку переводит ее в плоскость оценки «прогрессивности» согласованных изменений отдельных частей целостной системы.

Упомянутые выше прерывания потока энергии, усваиваемой биогеосферой, приводящие к ее физической эволюции в направлении увеличения потока энергии и роста неравновесности, обусловлены, по-видимому, в первую очередь колебаниями параметров земной орбиты, вызывающими оледенения и климатические изменения и происходящими, согласно Миланковичу, в среднем через $10^4 \div 10^5$ лет.* Сопоставление данных по увеличению эффективности фотосинтеза с приведенными представлениями дает возможность оценить уменьшение потока энергии через биогеосферу во время прерываний. Эта оценка вполне согласуется с существующими астрофизическими расчетами, по которым указанное уменьшение не превышает $10^0 \div 10^1$ % от общего потока.

Помимо сказанного, значительное влияние на эволюцию оказывает и неравномерность поступления из недр Земли в атмосферу необходимого для фотосинтеза углекислого газа. Существуют эпохи, при которых газоотделение CO_2 увеличивается. Они повторяются примерно каждые 200 млн лет, что коррелирует с обращением Солнечной системы вокруг центра Галактики. Вопрос этот, однако, еще далек от решения. В эпохи уменьшения газоотделения возникает недостаток CO_2, что инициирует кризис биогеосферы, поскольку продуктивность фотосинтеза не может уже оставаться на старом уровне, и биогеосфера оказывается неспособной пропускать прежний поток энергии через себя. Кризис приводит к дезорганизации биогеосферы, а также отдельных экосистем и влечет за собой вымирание как отдельных видов, так и целых таксономических групп организмов. Непосредственной причиной вымирания могут быть и явления меньшего масштаба, однако именно в кризисные эпохи их влияние становится наиболее значительным. В результате этого снимаются ограничения, обусловленные конкуренцией, на развитие других, до этого малочисленных классов и таксонов. Сказанное согласуется с палеонтологической летописью, согласно которой можно говорить о смене одной системы биогеосферы другой в начале кембрия, на границе селура с девоном, в середине триаса, а также в середине палеогена. Для каждой системы биогеосферы характерны свои главнейшие продуценты — растения, создающие необходимую базу для существования других организмов, так или иначе использующих растения в пищу.

На то, какие конкретные виды появляются в результате эволюционных изменений, огромное влияние, несомненно, оказывают и другие факторы среды, например содержание O_2 в атмосфере. Однако это не меняет сущности подхода к эволюции биогеосферы как целостной симбиотической системы, тем более что многие из упомянутых факторов являются внутренними для нее, поскольку в биогеосферу, помимо живых организмов, включено и все участвующее в круговороте вещество.

Резюмировать сказанное можно следующим образом: эволюция отдельных видов происходит в рамках соответствующих экосистем, а в конечном итоге — биогеосферы, и в случае отсутствия физической эволюции последней не имеет направленности, т. е. нефинальна.

Физическая эволюция биогеосферы заключается в росте ее неравновесности вследствие увеличения потока энергии через нее. Такая эволюция инициируется астрофизическими (колебания параметров орбиты Земли) и геологическими (газоотделение) причинами. В результате появляются виды, прошедшие более длительный эволюционный путь и обладающие поэтому бóльшим количеством биологически ценной информации, сохраняемой (но не при любых обстоятельствах используемой) системами генетической памяти.

Следует отметить, что в данной работе рассматриваются главным образом экологические аспекты эволюции и не затрагиваются проблемы микроэволюции, хотя несомненно, что астрофизические факторы оказывают влияние также и на нее.

Что касается человеческой цивилизации, то ее развитие не укладывается в описанную схему. Обусловлено это тем, что приспособление человека к новым условиям среды может происходить не за счет накопления и изменения информации генетической (генерация и отбор мутантов), а за счет использования и накопления информации иного, негенетического уровня (знания, культура).* Здесь мы имеем дело уже с новым по сравнению с эко-

---

* Популярный обзор по этому вопросу см.: *Кови К.* Орбита Земли и ледниковые эпохи. — В мире науки, 1984, № 4, с. 26—36.

* Другими словами, фундаментальная ниша (см. разд. 4) для человека и высокоразвитых животных может меняться исключительно за счет накопления негенетической информации и ее обмена.

системами рангом организации, при котором для существования системы цивилизация—среда исключительное значение начинает играть не только взаимообмен веществом и энергией, но и индивидуальным и общественным опытом, знаниями, идеями, т. е. информационный. Развитие человеческого общества управляется законами социальными, и без привлечения данных общественных наук, в первую очередь исторического материализма, правильное понимание его эволюции невозможно.

1. Философские и физические предпосылки модели эволюции биосистем

В настоящее время существует два научных подхода к понятию жизни: структурный и функциональный. Как следует из самого названия, при первом основное внимание уделяется конкретной физико-химической основе живого и «конструктивным» особенностям организмов, при втором же — их функциональным особенностям. Ф. Энгельс в «Диалектике природы» учел оба аспекта эволюции жизни: «Жизнь есть способ существования белковых тел, существенным моментом которого является постоянный обмен веществ с окружающей их внешней природой, причем с прекращением этого обмена веществ прекращается и жизнь. . .». В сноске добавлено: «. . .разница заключается в том, что в случае неорганических тел обмен веществ разрушает их, в случае же органических тел он является необходимым условием их существования» [1, с. 616].

И. С. Шкловский писал, что живая система представляет собой функциональную систему, и, следовательно, одной структурной характеристики недостаточно [2]. По утверждению А. Н. Колмогорова, достаточно полная модель живого существа по справедливости должна называться живым существом. Точку зрения, согласно которой функциональные и особенно кибернетические аспекты живого нельзя не учитывать, высказывал и А. А. Ляпунов: «Управление, понимаемое в широком, кибернетическом смысле, является самым характерным свойством жизни безотносительно к ее конкретным формам» [2, с. 149].

Учитывая сказанное, естественно принять, что в первом приближении жизнь — это особый вид процессов, направленных на сохранение структуры.

Остановимся подробнее на функциональных особенностях живого.

При рассмотрении жизни в функциональном плане можно выделить, по крайней мере, три составляющие функционирования [3—6]:

1) направленное на самосохранение;

2) направленное на сохранение популяции (только популяции организмов, обладающих этим свойством, могли выжить в процессе эволюции);

3) наконец, у организмов, стоящих на достаточно высокой ступени развития и имеющих высшую нервную систему, — связанное с деятельностью мозга (например, стремление к получению не необходимой на данный момент информации).

Эти составляющие относительно независимы и в отдельные моменты индивидуального развития (онтогенеза) могут находиться в противоречии друг с другом. Остановимся на функционировании, направленном на самосохранение.

В физическом плане самосохранение характеризуется поддержанием определенного уровня упорядоченности, т. е. сохранением структуры. Для описания упорядоченности можно, как это обычно и принято, использовать функцию энтропии. Известно, что для поддержания пониженного уровня энтропии в некоторой системе необходимо, чтобы в нее поступал поток энергии или поток «низкоэнтропийного» вещества [7, 8]. Поскольку процессы распада происходят все время, то часть потока энергии при этом из нетепловой преобразуется в тепловую [8]. Сказанное иллюстрируется хорошо известным в термодинамике соотношением — вторым законом термодинамики (см., например, [9]):

$$dA + \sum_i \mu_i dn_i = dU - TdS,$$

где A — работа внешних сил; μ_i — химический потенциал поступающего в систему или уходящего из нее i-го вещества; n_i — количество молей i-го вещества; dn_i — изменение их количества в результате химических реакций или массообмена со средой; U — внутренняя энергия системы; T — температура; S — энтропия системы.

В том случае, когда среднее количество вещества в системе (биосистеме) и ее состав не меняются (нет роста), удобно считать, что член химической энергии $\sum_i \mu_i dn_i$ также входит в A.

Можно обойти неудобства, связанные с наличием члена химической энергии и возникающие при рассмотрении биосистем, масса которых непостоянная, следующим образом: рассматривать не только саму эволюционирующую систему, а систему, в которую, помимо рассматриваемой, включено и все использованное на увеличение массы, т. е. рост, вещество, плюс произвольное количество вещества, не испытывающего эволюционных изменений. Количество таких «полных» систем бесконечно, и какую из них выбрать, — это только вопрос нормировки. Данный подход, как увидим ниже, особенно удобен при исследовании экосистем и биогеосферы.

Каким образом связать самосохранение в физическом плане с функциональными особенностями, присущими живому? Для того чтобы ответить на этот вопрос, остановимся вначале на некоторых кибернетических и философских вопросах, связанных с проблемой жизни.

Можно сконструировать автомат, который будет рассчитан, или, другими словами, будет иметь программы функционирования,

направленные на потребление определенных видов энергии или низкоэнтропийного вещества из среды при некоторых конкретных ее условиях, причем потребляемая им энергия будет использована для поддержания пониженного уровня энтропии, образно говоря, — на самопочинку. Такой автомат, однако, нельзя назвать «живым», поскольку в случае возникновения незнакомых условий среды, хотя бы и содержащей достаточное количество источников энергии, но таких, на которые автомат не рассчитан, он не сумеет воспользоваться ими и «погибнет». Живые же системы, как мы знаем из повседневного опыта, не настолько жестко «запрограммированы», и именно это дает им возможность выживать при самых различных обстоятельствах.

Из сказанного можно сделать вывод о том, что для самосохранения в реальной среде, с непредсказуемым образом меняющейся ситуацией, биосистеме необходимо не только а) обладать программами функционирования, направленными на потребление определенных видов энергии при некоторых конкретных условиях среды,* но и б) обладать способностью в незнакомой ситуации находить новые способы, новые программы функционирования, т. е. обладать способностью экспериментировать (у организмов, обладающих развитой нервной системой, в ряде случаев достаточен лишь мысленный эксперимент).

Для реализации п. «б» необходимо, в частности, чтобы система в противоречивой ситуации была бы не жестко детерминированной, а могла бы поступать случайным образом, или, другими словами, обладала бы некоторой свободой поведения — свободой выбора, что и наблюдается в действительности.

В философском плане правильнее говорить не о свободном, а о случайном выборе, поскольку свобода и эксперимент суть понятия социологические и гносеологические. Случайный выбор наблюдается во всех аспектах функционирования живых систем, причем чаще, чем это кажется на первый взгляд. В аспекте, связанном с деятельностью мозга, необходимость в нем возникает, например, потому, что в силу ограниченности времени и ресурсов мозга при той или иной ситуации, как правило, невозможно использовать всю имеющуюся информацию или же этой информации просто недостаточно. Известна также теорема Геделя, одно из следствий которой можно сформулировать следующим образом: в рамках теории нельзя обосновать истинность этой теории [10]. Это означает, что в случае наличия жесткой логической предопределенности мышления, не допускающей свободного интуитивного поиска и соответственно случайного выбора, необходимого для конструирования и перебора гипотез, построение принципиально новых представлений было бы вряд ли возможным. Последнее же, как мы знаем, опровергается действительностью.

* Отметим, что биосистеме важно обладать программами функционирования, а не просто так называемой информацией, хранящейся в памяти.

Естественно, что упомянутая выше случайность в поведении системы в значительной степени возможна как следствие микрослучайностей, имеющих место на уровне обработки информации о среде, производимой для выбора той или иной конкретной линии поведения. Особенно ярко эта случайность и связанная с ней непредсказуемость отдельных актов поведения * должны проявляться при обстоятельствах, в которых результат выбора не предопределен предшествующим опытом однозначно. Последнее можно сказать и о мысленном эксперименте.

Так как состояние свободы выбора при благоприятных обстоятельствах среды — это признак благополучия, то стремление к состоянию свободы не может не быть одним из мотивов поведения, по крайней мере, у организмов, обладающих элементами мышления.

Все сказанное в философском плане можно перевести на более формальный язык, если ввести понятие идеальной биосистемы, со свойствами которой можно сравнивать свойства биосистемы реальной (о философских подходах к проблеме жизни см. [5—8]).

2. Идеальная биосистема

Выше говорилось, что для самосохранения живая система в незнакомой или противоречивой ситуации должна обладать способностью поступать случайно, или, другими словами, «экспериментировать». Реально результаты того или иного эксперимента биосистемы могут быть неудачными, поэтому разумно ввести понятие идеальной биосистемы, для которой характерно то, что при недостатке энергии она обязательно ищет, находит, а в дальнейшем обязательно использует новые способы получения энергии. Последнее требование добавлено потому, что новые способы, найденные в критической ситуации, не всегда могут использоваться реальной биосистемой в норме. Если быть более точным, то следует постулировать, что идеальная биосистема функционирует так, чтобы уровень энтропии ее структур не повышался, поскольку в противном случае она гибнет [7, 8]. Помимо этого, данное функциональное определение следует дополнить требованием полноты (см. раздел 1). Тогда, считая, что температура $T \simeq \text{const}$, химическая энергия входит в работу внешних сил (их сумма здесь — свободная энергия), а увеличение свободной энергии не приводит к уменьшению внутренней энергии (как и $T \simeq \text{const}$, это вполне естественное для биосистем предположение), можно указать на следующие характерные особенности идеальной биосистемы. Во-первых, это — полная система, во-вторых, она в любой ситуации функционирует так, чтобы уровень энтропии

* Разумеется, что выбор, вообще говоря, производится из ограниченного количества вариантов, т. е. внутри некоторого «поля выбора», определяемого сложившейся ситуацией и имеющимся индивидуальным и эволюционным предшествующим опытом. Количество в принципе не запрещенных вариантов, как правило, больше.

ее структур не повышался. Наконец, она стремится к использованию одновременно всех имеющихся у нее способов извлечения энергии из среды. Отметим сразу же, что для реальных систем в общем случае имеет место только принцип неуменьшения потока энергии.

Каждый способ извлечения энергии можно сопоставить с каналом поступления энергии. Временное прерывание или уменьшение поступления потока энергии по одному или нескольким используемым каналам (суммарный поток через них при этом уменьшается на некоторую величину j) будем называть прерыванием. При каждом прерывании у идеальной биосистемы возникают новые каналы, которые в дальнейшем она использует для понижения уровня энтропии. Многие реальные биосистемы, например отдельные организмы, используют далеко не все каналы, и прерывания приводят лишь к увеличению числа каналов, потенциально возможных для использования. Последнее есть следствие наличия у организмов онтогенетических программ развития, запрещающих увеличение выше определенной величины их массы, размеров и потока энергии через элемент объема.

Реально могут встретиться ситуации, когда семантически трудно определить, что значит «новый» канал поступления энергии, новый способ и т. п. Поэтому следует еще более формализовать определение идеальной биосистемы и считать, что в ответ на прерывание, характеризующееся j, она по окончании прерывания увеличивает общий поток на j. Про каналы в этом случае можно говорить лишь условно.

Имеет ли идеальная биосистема какие-либо аналоги в реальности и имеет ли смысл вводить это понятие?

Чтобы ответить на этот вопрос,остановимся кратко на проблеме иерархии биологических объектов. Можно говорить о разных уровнях строения живого. Это, например, следующие уровни [11, 12]: одноклеточные организмы, многоклеточные организмы, популяции, экосистемы, биогеосфера. В плане функционирования с целью самосохранения представляется логичным выделить следующие уровни: одноклеточные организмы, клетки многоклеточных организмов, многоклеточные организмы, экосистемы, биогеосфера.*

Ниже будет показано, что в функциональном аспекте, а точнее, в плане самосохранения к идеальным биосистемам ближе всего стоят экосистемы и биогеосфера в целом.

Поскольку в дальнейшем к рассмотрению отдельных организмов мы уже не будем возвращаться, здесь остановимся на них подробнее.

---

* Согласно В. И. Вернадскому, биогеосфера представляет собой «слой сгущений жизни» и ее элементарными ячейками являются биогеоценозы. Последние, помимо живых организмов, включают в себя также косное вещество среды, участвующее в круговороте; наличие обмена веществом через среду позволяет говорить о существовании связей через среду между компонентами биогеоценозов и биогеосферы. Биогеосфера является подсистемой биосферы, включающей также удаленные части атмосферы и земной коры.

В случае отдельных организмов потребление энергии (низкоэнтропийного вещества) происходит периодически по сигналам датчиков, опосредовано сообщающих о повышении уровня энтропии каких-либо структур организма. Это происходит в соответствии с имеющимися или находимыми в процессе поиска программами функционирования. Время роста по сравнению с периодом, через который происходит потребление энергии, существенно больше, а сам рост управляется другими программами (онтогенетическими). Можно говорить, что в функциональном отношении жизнь организмов — это квазиавтопериодический процесс (аналог самовозбуждения в электронике) или, более широко, самосохранение замкнутых причинно-следственных цепей типа среда→биосистема→среда (см. в связи с этим [8] и о «принципе устойчивого неравновесия» [7]).

Хотя для создания низкоэнтропийного вещества взамен того, которое подверглось деструкции, требуется в принципе лишь небольшая часть из всего потока поступающей энергии [3, 4], а основное количество энергии идет на «обслуживающие» процессы (например, дыхание, движение с целью получения пищи и т. п.), однако это не меняет сущности подхода, поскольку все равно для каждого из классов организмов можно говорить о некотором среднем, необходимом для самосохранения потоке энергии на единицу его живой массы.

3. Эволюция идеальной биосистемы

Как уже говорилось, после каждого прерывания поток энергии через идеальную биосистему увеличивается. Последнее схематически дано на рис. 1 и 2, где изображен случай, когда прерывания неодинаковы и каждый раз приводят к временному выключению разных энергетических каналов. Однако, если среда обладает ограниченными энергетическими возможностями, то рано или поздно все реально доступные источники энергии будут исчерпаны и при очередном прерывании произойдет «энергетический кризис» биосистемы (рис. 3) [13].

Несложно получить простейшие соотношения для идеальной биосистемы, которые отражают сказанное. В случае редких и одинаковых прерываний со средним периодом t^* они будут следующими:

$$0 \leqslant \mathscr{E}(t) \lesssim \frac{P(t)\,t}{2\theta}, \qquad (1)$$

$$0 \leqslant \mathscr{E}(t) \lesssim j\,\frac{t^2}{2t^*}, \qquad (2)$$

$$t_{кр} \gtrsim \frac{t^*}{k} - t_{нач}, \qquad (3)$$

где $\mathscr{E}(t)$ — полная энергия, использованная биосистемой, при условии $\mathscr{E}_{нач} \simeq 0$; θ — время приспособления к условиям при

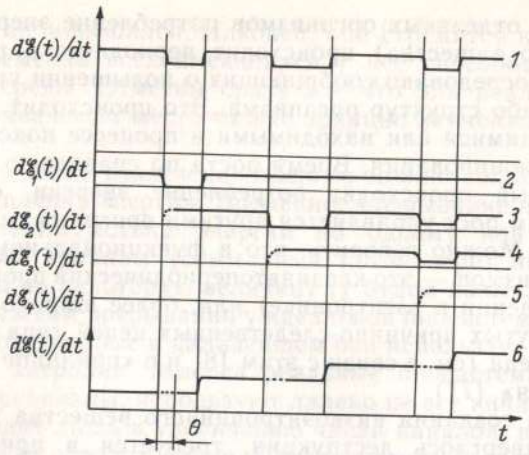


Рис. 1. Включение каналов у идеальной биосистемы вследствие прерывания.

1 — поток энергии через среду; *2* — поток энергии через канал *1*; *3* — через канал *2*; *4* — через канал *3*; *5* — через канал *4*; *6* — суммарный поток энергии через биосистему; θ — время приспособления к условиям при прерывании; масштаб произвольный.

прерывании; $P(t)$ — «энергия прерывания», т. е. сумма энергий, недоданных по традиционным каналам за промежуток времени θ; t — время эволюции; j — величина, на которую уменьшается поток энергии во время прерываний; $t_{кр}$ — время, через которое должен произойти кризис; $t_{нач}$ — член, учитывающий эволюционные изменения до начала эволюции по рассматриваемому типу; k — относительное уменьшение потока энергии во время прерываний; t^* — период прерываний.

Соотношения выполняются, если длительность прерываний больше θ, но меньше времени жизни биосистемы, точнее, того времени, пока система «помнит» о каждом прерывании.

Изложенные выше представления можно использовать при

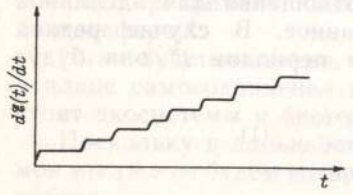


Рис. 2. Увеличение потока энергии $\frac{d\mathcal{E}(t)}{dt}$ через идеальную биосистему в результате прерываний.

Масштаб произвольный.

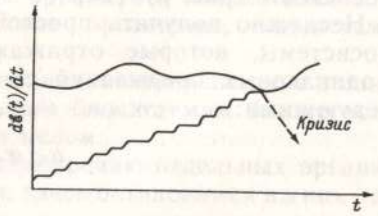


Рис. 3. Возникновение кризиса идеальной биосистемы при невозможности сохранения потока энергии во время прерываний вследствие ограничений на возрастание потока со стороны среды.

Масштаб произвольный.

рассмотрении эволюции таких биосистем, как экосистемы и биогеосфера. Для этого, однако, необходимо вначале подробнее остановиться на их структурных и функциональных особенностях.

4. Внутренние связи и консервативность структур экосистем

Современное изучение экосистем и их изменений ведется целиком в стационарном аспекте [14], поскольку базируется на повторимости результатов экспериментов и наблюдений, предусматривающей, что объект исследования при любых изменениях остается самим собой. Можно обосновать, что эволюционных выводов из результатов таких исследований сделать принципиально невозможно (см. подробнее [14]). Между тем правильно понимать эволюцию видов можно лишь тогда, когда будут понятны закономерности эволюции всего их биологического окружения и взаимосвязей. В связи с этим следует несколько уточнить понятие экосистемы, так как существующие в данный момент трактовки этого понятия имеют главным образом описательный характер. Так, например, согласно Р. Уиттекеру, экосистема — это «сообщество и его среда, рассматриваемые совместно как функциональная система, образующая единое целое и характеризуемая присущим ей потоком энергии и круговоротом вещества. . .» [15, с. 9].

Не существует видов вне экосистем. По этой причине рассмотрение эволюции видов неразрывно связано с рассмотрением эволюции экосистем. Среди последних можно выделить простые, примитивные экосистемы, в которых соотношение между численностями популяций в течение времени их существования сохраняется, число видов мало, а связи между популяциями неизменны, и сложные экосистемы, для которых сказанное не соблюдается [15]* (см. раздел 10).

В настоящее время понятие симбиоза не всегда трактуется одинаково. Обычно под симбиозом (мутуализмом) понимают такие взаимоотношения, при которых организмы каждого из двух взаимодействующих видов создают друг для друга необходимые условия и тем самым способствуют существованию друг друга. Для связей «по существованию» между популяциями A и B в этом случае имеет место замкнутая связь $A \rightleftarrows B$; имеются также связи между системой $A \rightleftarrows B$ и средой, например $\rightarrow A \rightleftarrows B \rightarrow$.

В экосистемах популяции различных видов взаимосвязаны, поэтому следует обобщить понятие симбиоза на большее, чем два, число подсистем, например $\rightarrow \underline{A \rightarrow B \rightarrow C} \rightarrow$. Симбиотической в обобщенном смысле, или экобиотической, будем называть такую систему, в которой имеется один или несколько объединенных хотя бы одним ребром циклов и нет подсистем, независимых от других подсистем системы («управляющих»). Паразиты не

* Ниже будут рассмотрены иные особенности экосистем, позволяющие производить введенное подразделение более строгим образом.

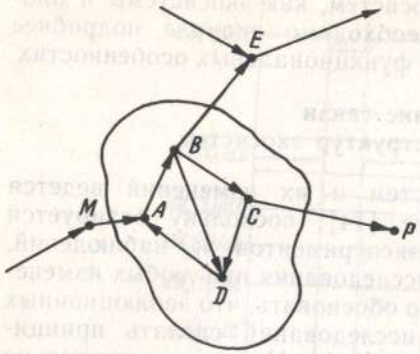


Рис. 4. Пример связей по существованию (*стрелки*) между отдельными подсистемами A, B, C, D в экобиотической системе, расположенной внутри ограничивающей линии.

M и P — управляющая и паразитическая по отношению к ней подсистемы (в систему не включены).

включены в систему (рис. 4). Число вершин циклов не ограничивается. Под экосистемой следует понимать взаимообусловленный комплекс живых и косных компонентов среды, представляющий собой экобиотическую конструкцию. Отметим, что крупные экосистемы могут иметь подсистемами более мелкие, например $\rightarrow A \rightarrow B \rightleftarrows C \rightarrow D \rightarrow$. Понятно, что симбиотическая (по типу мутуализма) система представляет собой частный случай экобиотической.

Для экобиотической системы характерно, что ее части взаимосвязаны, и поэтому существование и эволюция ни одной из этих частей не могут быть независимыми от других. По сути, это следствие замкнутости связей «по существованию». Если связи в такой системе, например простой экосистеме, жесткие, т. е. имеют устойчивый, повторяющийся и однозначно связанный с условиями среды характер, то в некотором диапазоне этих условий, когда взаимосвязь между частями сохраняется, система (простая экосистема) будет консервативна к самопроизвольным изменениям своей конструкции и к эволюции входящих в нее видов. Считаем, что экобиотическая система (экосистема) остается сама собой, несмотря на сезонные или какие-нибудь иные повторяющиеся периодические изменения ее характеристик. Время рассмотрения должно быть много больше периода указанных изменений (см. ниже). В случае простой экосистемы последнее можно уяснить из следующих рассуждений. Так как независимая эволюция ее взаимосвязанных популяций невозможна (связи замкнуты и изменение свойств любой из популяций ведет к изменению условий жизни всех остальных и ее самой), а вероятность одновременных и согласованных мутаций у всех особей разных популяций крайне мала, то внутренняя среда экосистемы, определяемая при постоянстве внешних условий большинством особей каждого из видов, малочувствительна к отдельным мутантам, не может меняться быстро и в первом приближении неизменна. Неизменность внутренней среды стабилизирует видовые характеристики популяций простой экосистемы, неизменность же характеристик влечет за собой неизменность внутренней среды.

Сказанное наблюдается несмотря на постоянное появление мутантов, неспособных включаться в экобиотические отношения.

Среди них можно выделить два типа: первые сразу же отбрасываются отбором, как неспособные существовать в предоставляемых экосистемой условиях, вторые же, выживая, представляют собой неизбежный паразитический «балласт», истощающий внутреннюю среду (в среднем более-менее определенным образом). Воздействие на систему вторых по сути эквивалентно воздействию неблагоприятных и ограничивающих рост популяций внешних факторов, например поедание особей какой-либо из рассматриваемых популяций особями другой популяции, не включенной в систему (связи из системы во вне). «Справится» или нет система с такого рода воздействиями — вопрос, относящийся к проблеме устойчивости и «выживаемости» экосистем, и здесь он рассматриваться не будет. В дальнейшем будем анализировать только заведомо «выживающие» экосистемы.

Из вышеизложенного понятно, что в случае сохранения условий внешней среды и постоянства скорости генерации мутантов второго типа видовой состав, видовые особенности, а также топология и значимость связей в простой экосистеме практически не меняются. Последнее есть следствие неизменности внутренней среды экосистемы, определяемой здесь ансамблем организмов разных взаимозависимых популяций, объединенных жесткими и замыкающимися в циклы связями. Изменение условий среды должно вести к эволюции соответствующих видовых фенотипических признаков, однако далеко не любое «направление» такого рода эволюции возможно в рамках сохранения устойчивости экосистемы. Связано это с тем, что большинство из мутаций в генотипе влечет за собой изменение сразу же нескольких признаков, и поэтому весьма вероятно, что среди последних в ряде случаев оказываются те, которые ответственны за взаимодействие между популяциями. Все это означает, что у простых экосистем возможности к «плавной» эволюции в значительной мере ограничены (особенно это касается самопроизвольных изменений), а их существование в неконстантной среде приближается к существованию по принципу «все или ничего». Данные представления можно выразить более строгим образом, если использовать понятие ниши (см. ниже). В качестве простейшего примера, иллюстрирующего консервативность к изменениям экобиотической конструкции, видовых особенностей и видового состава в процессе индивидуального развития, можно привести экосистемы горячих источников. Аналогичную картину можно в миниатюре наблюдать на примере лишайника [16].

Однако только что рассмотренная ситуация имеет место далеко не всегда. В сложных экосистемах наблюдаются и относительно быстрые плавные непрерывные изменения (иногда — самопроизвольные), для которых характерно несохранение значимости и топологии связей, а также несохранение соотношения между численностями популяций. Особенно ярко такого рода явления наблюдаются в случае водных экосистем [17]. При этом на первый план время от времени могут выступать связи до определенного момента

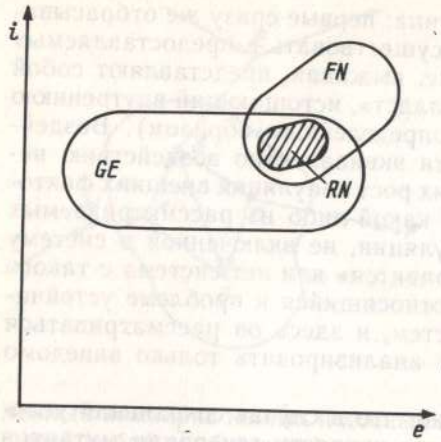


Рис. 5. Область предоставляемых условий *GE*, фундаментальная ниша *FN* и реализованная ниша *RN* в многомерном пространстве параметров.
Двумерный случай; масштаб произвольный.

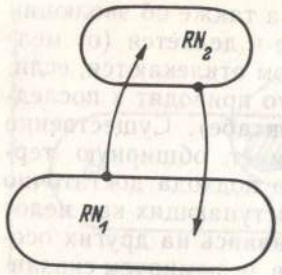
слабые и неустойчивые. Для описания простых и сложных экосистем в рамках одного подхода следует рассмотреть многомерное пространство параметров условий среды, а в нем многомерные реализованные ниши *RN* каждого вида, которые вложены в перекрытие области предоставляемых условий *GE* (создается внешней средой и организмами взаимосвязанных популяций) и области фундаментальной («идеализированной») ниши вида *FN*, т. е. $RN \in GE \cap FN$. Фундаментальная ниша здесь — это многомерная область, в которой вид в силу своих биологических видовых особенностей может в принципе существовать при отсутствии каких-либо внешних ограничений, а реализованная ниша — область, которую он фактически занимает (см. [17] и рис. 5). Для наглядности *GE*, *FN* и *RN* можно представлять себе как булевы множества.* Изменение *FN* означает изменение видовых особенностей, по сути — фенотипических признаков, в то время как в случае *RN* это не так. Пространство, в котором рассматриваются все упомянутые области, будем считать бесконечномерным (в этом случае мы не рискуем потерять часть параметров, какие бы популяции не изучали), размерность областей $GE \cap FN$ конечна в силу конечности размерности *FN*.

Необходимо отметить, что представление о *GE*, *FN* и *RN* как об областях с четкими границами, хотя и удобно, однако является весьма «сильным» упрощением, в рамках которого изучение характеристик популяций и *GE* становится зависимым от промежутка Δt времени их рассмотрения (при уменьшении Δt объем *GE* также уменьшается). С формальной точки зрения это является значительным недостатком, но с практической допустимо, поскольку можно выбрать такие Δt (например, превышающие периоды сезонных или иных повторяющихся вариаций), для которых зависимости характеристик от времени слабые. В случае таких промежутков можно говорить о диапазонах изменения тех или иных параметров, описывающих среду и популяции, а также об эволюции диапазонов, что часто в той или иной форме и делается (от мелкомасштабных во времени изменений при этом отвлекаются, если, конечно, они не таковы по интенсивности, что приводят к последствиям, проявляющимся в выбранном масштабе). Существенно также следующее: если экосистема занимает обширную территорию, то в рамках данного упрощенного подхода достаточно проводить рассмотрение для отдельных и выступающих как целое ее фрагментов (см. раздел 5). Не останавливаясь на других особенностях свойств экосистем и их фрагментов, резюмируем сказанное: использование понятий *GE*, *FN* и *RN* позволяет получить ряд качественных выводов, однако при условии, что численности популяций значительны, а промежутки Δt выбираются соответственно изучаемым изменениям в экосистеме. Поскольку ниже нас будут интересовать изменения, обусловленные главным образом мутационным процессом, то Δt в этом случае должно быть больше времени жизни наиболее долгоживущих особей экосистемы и, кроме того, превышать периоды закономерно повторяющихся вариаций. При более строгом подходе следовало бы говорить не о *FN*, а о функции плотности вероятности, не о *GE*, а о траектории изменения условий в многомерном пространстве (используя данные о последней, при некоторых предположениях можно построить соответствующие функции плотности вероятности, в частности для $t = \Delta t$, и по ним — *GE*), наконец, не о *RN*, а об индивидуальных для особей и суммарной для популяции траекториях. Все это, однако, темы для специального обсуждения. Ниже приведены только некоторые качественные рассуждения, необходимые в дальнейшем.

Из вышеизложенного понятно, что *RN* — это совокупность «входных» по отношению к популяции условий (физико-химических, энергетических) на некоторой части занимаемой популяцией территории. Другими словами, *RN* — это то, чем популяция (или ее фрагмент) пользуется, *FN* — то, чем она «умеет» пользоваться. Понятно также, что *RN* не обязана целиком занимать всю область $GE \cap FN$ и что заполнение последней — процесс относительно быстрый по сравнению с процессом изменения *FN*. В самом деле, для изменения *FN* (внутри *GE*) необходимо появление, выживание и множественное репродуцирование мутантов, в то время как адаптивное изменение *RN* при заполнении $GE \cap FN$ — явление безмутационное, для которого ряд ограничений отсутствует.

В случае простых экосистем у каждого из видов имеется своя, неперекрывающаяся с другими *RN* (рис. 6). Стрелками, символически изображающими связи «по существованию», показано, что каждая из популяций обеспечивает для другой в совокупности с внешними факторами среды необходимые условия жизни и тем самым дает последней возможность иметь свою *RN*. Отметим, что в рамках данного подхода, при котором под *RN* понимается по сути область, «заполненная» популяционной траекторией, наличие перекрытия разных *RN* автоматически означает, что в подобласти перекрытия существует пересечение соответствующих этим *RN*

* В настоящее время нет единства в определении понятий *FN* и *RN*. Здесь использована трактовка, близкая к принятой в [17 и 18]. Имеются также и другие подходы — см., например, [19]. В связи с этим по ходу изложения делается ряд уточнений.



траекторий, хотя понятно, что фактически этого может и не быть, например, по причине временных несовпадений. Однако явления, обусловленные непересечением траекторий, при наличии перекрытия ниш, несомненно, гораздо более редки, и здесь их не имеет смысла учитывать.

Рис. 6. Реализованные ниши простой экосистемы и связи между ними.

Выше говорилось, что несмотря на постоянное появление мутантов, простая экосистема консервативна к изменениям. Из изложенного вытекает, что это утверждение эквивалентно утверждению о неизменности FN. Итоговая логическая схема здесь будет следующая: FN «стремится» занять GE, в то же время FN относительно консервативна. RN более лабильна и при этом $RN \rightarrow GE \cap FN$. Консервативность первого порядка имеем при $RN = GE \cap FN$ (при этом относительно стабилизируются численности и состав популяций), а второго — когда при наличии первой, FN целиком заполняет GE, т. е. когда $GE \cap FN = GE$ (см. о «климаксных» сообществах [17, 18, 20]). Последнее маловероятно в силу морфогенетических «конструктивных» ограничений по FN (из-за них некоторые изменения фенотипических признаков практически невозможны), и поэтому реально вряд ли встречаются FN и RN, по всем направлениям ограниченные GE экосистемы. Трудно найти и такую FN, изменения которой ограничены только морфогенетическими особенностями — консервативность третьего порядка. Прекращение эволюционных изменений FN связано, как правило, с сочетанием явлений, приводящих в пределе к консервативности второго и третьего порядков. Этим, по-видимому, и обусловлена крайне низкая изменчивость некоторых примитивных экосистем на протяжении десятков и сотен миллионов лет [17—20].

Простые экосистемы, обладая жесткими связями, «рассчитаны» на определенный диапазон условий среды и, имея конкретные GE, обладают «иммунитетом» по отношению к проникновению в них несвойственных видов. Если изменения среды постепенны и незначительны, то такие экосистемы способны приспособиться к новым условиям за счет медленного изменения FN при отсутствии консервативности третьего порядка. Если же условия меняются настолько резко, что в случае хотя бы одной из популяций FN перестает перекрываться с GE, то особи гибнут, структура внутренних связей нарушается и экосистема дезорганизуется. В дальнейшем из оставшихся видов и видов сопредельных территорий возможна самоорганизация новой экосистемы. Таким образом, в случае простых экосистем может происходить либо медленная эволюция, либо эволюция, проходящая через стадию переорганизации, т. е. дезорганизацию и последующую самоорганизацию (о самоорганизации см. [21, 22]).

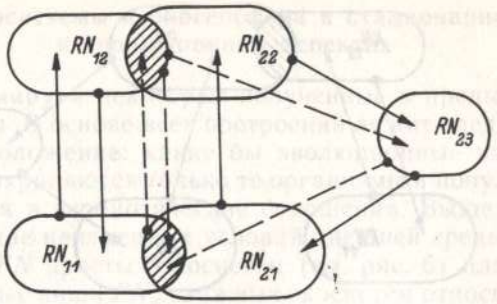


Рис. 7. Взаимодействие простых экосистем, приводящее к возникновению сложной экосистемы.

Области объединения $RN_{11} \cup RN_{21}$ и $RN_{12} \cup RN_{22}$ — групповые реализованные ниши RN_g.

Если на одной и той же территории сосуществуют две или более простые экосистемы, то возможна ситуация, когда некоторые части их RN перекрываются. Для областей перекрытия можно представить суммарную картину связей (рис. 7), где они изображены пунктиром, и это означает, что мы имеем новую более сложную экобиотическую конструкцию.* В областях перекрытия имеют место конкурентные отношения, которые в принципе могут продолжаться бесконечно долго, неоднократно проходя через фазы временного квазиустойчивого равновесия. Исход отношений, хотя и зависит от условий среды, в то же время достаточно случаен. В результате конкуренции границы ниш RN в области перекрытия колеблются, меняются численности популяций и значимость тех или иных связей в рассматриваемой суммарной конструкции. Именно такую нестационарную картину мы имеем в случае сложных экосистем, под которыми, как это вытекает из изложенного, и следует понимать группу взаимодействующих простых экосистем, имеющих минимум по две перекрывающиеся RN. В противном случае каждая из простых экосистем будет представлять для другой фактор среды (рис. 8).

Если мы рассмотрим фундаментальные ниши FN простых экосистем, составляющих сложную экосистему, то в направлении во вне от суммарных областей объединения их RN скорости изменения FN остаются так же низки, как в случае отдельных простых экосистем. Поэтому разумно ввести понятие групповой реализованной ниши $RN_g = RN_1 \cup RN_2 \cup \ldots \cup RN_i$ и групповой фундаментальной ниши $FN_g = FN_1 \cup FN_2 \cup \ldots \cup FN_i$, где i — число участвующих в объединении простых экосистем. При заполнении $GE \cap FN_g$ соответствующей RN_g можно говорить о консервативности первого порядка у сложной экосистемы, а при $GE \cap FN_g = GE$ — о консервативности второго порядка.

* Согласно принципу Гаузе [17], размерности областей перекрытия стремятся к уменьшению.

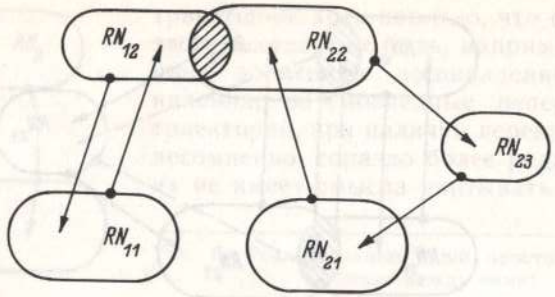


Рис. 8. Конкурентные отношения между двумя простыми экосистемами.

Что же касается изменения FN отдельных популяций в сторону чужих RN в области перекрытия RN, то здесь скорость изменения может быть выше, чем в иных направлениях. Это обусловлено тем, что мутанты, попадающие в чужие RN, не отбрасываются, а могут успешно существовать в условиях, предоставляемых им другой экосистемой. Конкуренция противодействует указанным процессам взаимопроникновения, что лишь усложняет динамику последних, поскольку фактор конкуренции не имеет абсолютного характера и непостоянен во времени. Изменение FN представляет собой по сути изменение видовых особенностей, и, таким образом, в случае сложных экосистем, несмотря на консервативность FN_g, относительно быстрая эволюция отдельных видов вполне возможна (см. [18] и о дивергенции [17, 23]). Другими словами, несмотря на наличие всех внешних и хорошо известных атрибутов биологической эволюции, наблюдающихся при рассмотрении какой-нибудь сложной экосистемы, глобальной эволюции всей системы, приводящей к изменению RN_g и FN_g, может практически не происходить.

Что же означает консервативность RN или RN_g, заполняющих область $GE \cap FN$ или $GE \cap FN_g$? Это означает, что при использовании экосистемой внешних по отношению к ней факторов среды, в том числе энергетических и создаваемых другими экосистемами, изменений может не происходить. И это в то время, когда процессы биологической эволюции в классическом понимании внутри системы не прекращаются (см. в связи с этим [21, 22]). Ниже мы остановимся на выводах, которые следуют из этого важного результата.

Более строгое рассмотрение затронутых здесь вопросов требует оценки вероятности возникновения тех или иных циклов, составленных из связей «по существованию» между RN различных взаимодействующих популяций. Для этого необходим ряд уточнений понятий GE, FN и RN, без которых формальный подход к описанным в этом разделе явлениям невозможен.

5. Экосистемы и биогеосфера в стационарном и эволюционном аспектах

Кратко суммируем некоторые полученные в предыдущем разделе результаты. В основе всех построений лежит следующее естественное предположение: какие бы эволюционные изменения не происходили, сохраняются только те организмы и популяции, которые включаются в экобиотические отношения. Выше было показано, что в случае неизменных условий внешней среды фундаментальные ниши FN простых экосистем (см. рис. 6) или групповые фундаментальные ниши FN_g сложных экосистем относительно консервативны к изменениям, и поэтому рано или поздно достигается ситуация, при которой реализованные ниши RN или групповые ниши RN_g (см. рис. 7) также становятся консервативны, причем в случае сложных — несмотря на возможный дрейф RN и FN отдельных популяций внутри RN_g.

Консервативность RN или RN_g влечет за собой консервативность в плане использования экосистемой внешних факторов среды, в том числе и энергетических.* Описанная ситуация есть следствие инерционности изменений внутренней среды системы, определяемой при указанных обстоятельствах ансамблем организмов разных взаимозависимых популяций, объединенных замыкающимися в циклы связями «по существованию».

При изменении условий среды возможна либо медленная плавная эволюция, либо при резкой смене условий эволюция, проходящая через коренную перестройку (переорганизацию) связей, RN, FN (RN_g, FN_g), видовых особенностей и видового состава экосистемы, т. е. через переорганизацию структуры.

Какие выводы следуют из этого, если соотнести сказанное с известными особенностями внутреннего строения и эволюции экосистем? Никогда не перекрываются реализованные ниши, соответствующие видам разных трофических уровней экосистем. Другими словами, ниши продуцентов (практически всегда растений), консументов (потребителей живого органического вещества) и редуцентов (потребителей органических остатков — «мертвого» органического вещества) разные. В пределе можно рассматривать неперекрывающиеся непрерывные или почти непрерывные групповые реализованные ниши $RN_g = RN_1 \cup RN_2 \cup \ldots \cup RN_i$ для каждого из трофических уровней некоторой территории или даже всей биогеосферы. В природе встречаются экосистемы с числом уровней, доходящим до 7—8 [20] (рис. 9). Вопрос, почему перекрытия не происходит, не решается в рамках данной модели. По-видимому, это следствие морфогенетических ограничений и, в частности, причин биохимического характера, хотя скорей всего существуют гораздо более глубокие причины.

---

* На практике может оказаться трудным определить, является ли изучаемое сообщество сложной экосистемой или совокупностью простых. Если нас интересует использование сообществом энергетических и других внешних факторов среды, то это, как видим, не принципиально.

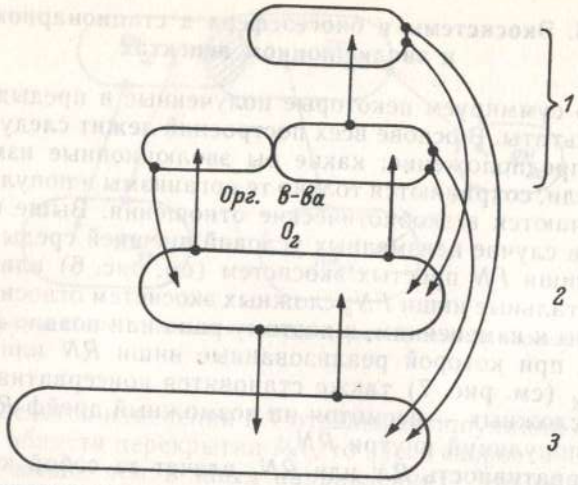


Рис. 9. Схематическое изображение RN_g крупных экосистем и биогеосферы.
1 — консументы; *2* — продуценты; *3* — редуценты.

В случае простых экосистем имеют место экобиотические отношения между видами, имеющими неперекрывающиеся *RN*. В случае сложных экосистем и биогеосферы такие же отношения существуют между видами разных трофических уровней, однако здесь уже не перекрываются групповые RN_g. Если быть более точным, то для биогеосферы следует говорить об RN_g ее отдельных континентальных блоков, связанных через среду взаимообменом веществ и имеющих перекрытие реализованных ниш одной и той же трофической значимости, но разных блоков, главным образом только на уровне редуцентов (взаимообмен простейшими и бактериями через океаны и атмосферу) * (см. рис. 9). Составленные из элементарных связей между популяциями связи между уровнями имеют замкнутый характер, и поэтому сложные экосистемы и биогеосферу можно рассматривать как своего рода пронистые экосистемы, консервативные при неизменной среде к изменениям своей конструкции и групповых RN_g, но с той, однако, принципиальной разницей, что в качестве подсистем здесь следует брать уже не популяции отдельных видов, а группы видов, имеющих общую групповую RN_g уровня. Ситуация здесь сходна с той, которая имеет место в лишайнике: несмотря на чередование генотипов одноклеточных организмов, его составляющих, топология и взаиморасположение реализованных ниш, а также видовой состав лишайника на протяжении его жизни не меняются. В случае же

* Интересна в связи с этим «параллельность» эволюции всех трофических уровней разных блоков биогеосферы при разительно отличающемся видовом составе. Это указывает на всеобщность принципов эволюции биогеосферы как системы, а также фрагментов последней и на одинаковость факторов, вызывающих ее.

сложных экосистем и биогеосферы разным генотипам соответствуют, вообще говоря, уже разные виды, и поэтому, хотя чередование генотипов наблюдается, а виды сменяют друг друга, но если групповые RN_g сохраняются, эволюция также нефинальна, или, образно говоря, «топчется на месте» (о нефинальности см. [21, 22]).

Неизменность геоастрофизических факторов приводит к стабилизации *GE*, FN_g и RN_g биогеосферы, включающей в себя как живые, так и косные компоненты. Происходит это, разумеется, после достижения равновесия между процессами, «уничтожающими» среду (использование ее факторов), и процессами самовосстановления среды. Равновесие влечет за собой стабилизацию условий на Земле в планетарном масштабе. Принципиальные эволюционные изменения биогеосферы как системы, ведущие, например, к изменению ее энергетики, к широкому распространению новых классов организмов, могут происходить после воздействий, влияющих на нее в целом, меняющих области *GE* и, как итог, RN_g и FN_g в случае достаточно длительных воздействий. Если воздействия не велики, возможно приспособление биогеосферы к новым условиям (RN_g и FN_g смещаются в соответствии с требованиями внешней по отношению к ней среды), если же они значительны, возникает глобальная переорганизация, сопровождающаяся появлением новых групп организмов, экобиотических конструкций и экосистем разных рангов, а также изменением условий жизни и изменением ареалов распространения существовавших до этого момента видов и классов. Такие «кризисы» биогеосферы, вероятно, уже имели место в прошлом (о смене фаун см. [24], а также разделы 7 и 8).

Поскольку внутри RN_g нефинальная эволюция может происходить все время, то это означает, что про биологический вид можно говорить лишь в стационарном аспекте, сделав тот или иной временной срез. Данный подход ослабляет остроту проблемы биологического прогресса и проблемы соотношения эволюционного и стационарного аспектов в эволюции [14].

Проведенное абстрактное рассмотрение самых общих особенностей биогеосферы и экосистем и далеко не всех возможных вариантов взаимодействия последних не исчерпывает весь круг вопросов, связанных с описанием известных из экологии явлений. На некоторых из них имеет смысл кратко остановиться (см. также раздел 10).

Из того, что в случае биогеосферы наверняка не перекрываются только RN_g разных трофических уровней, не следует, конечно, что о существовании отдельных экосистем (как простых, так и сложных) с характерными для них видами говорить нельзя. И дело здесь не только в том, что имеются экосистемы различных иерархических рангов с разными характерными временами внутренних процессов (см. рис. 4 и 9). Хорошо известно, что каждым конкретным природным условиям соответствуют свои животно-растительные сообщества, а следовательно, и экосистемы. Послед-

нее, очевидно, обусловлено тем, что практически не существует видов с такими сверхуниверсальными FN, способными меняться в любых пределах, при наличии которых эти виды могли бы существовать в любой среде или, по крайней мере, могли бы свободно и при любых обстоятельствах преодолевать области с неподходящей средой. В сочетании с наличием естественных природно-климатических границ это приводит к ряду ограничений на возможность территориального совмещения (отсюда, например, изоляты), а значит, и перекрытия RN или RN_g. Более того, даже при территориальном совмещении не все ниши могут перекрываться вследствие видовых особенностей, выработанных в процессе предшествующей совмещению эволюции. Не вдаваясь в подробности, отметим, что в силу сказанного, а также конкуренции и ограничивающих факторов в ряде случаев возможно возникновение относительно независимых экосистем, разделенных пограничными зонами — экотонами, снижающими эффекты взаимовлияния и нередко занятыми менее специализированными пограничными видами.* Следует сказать, что в процессах образования относительно независимых экосистем имеется ряд черт, сходных с процессами образования физических структур [25, 26].

Бесконечно долгое устойчивое существование на некоторой территории сложившейся структуры относительно стабильных («климаксных» [17, 20]) сообществ и соответственно экосистем (нефинальная эволюция некоторых видов внутри сложных экосистем тем не менее не исключена) может продолжаться при невозможности их территориального совмещения и (или) перекрытия ранее не перекрывавшихся RN_g этих систем. Последнее более вероятно, если физико-географические условия в каждой из подобластей рассматриваемой территории остаются неизменными, а нетрадиционные для нее процессы обмена организмами (в том числе мутантами) отсутствуют.

Если же упомянутой неизменности условий нет и (или) начинается не «теряющееся в шумах» взаимопроникновение и взаимообмен организмами, возникает конкуренция между традиционными для экосистем видами и «пришельцами», изменение RN и FN видов и т. д., структура разрушается, а в итоге возникает новая квазиустойчивая конструкция. Сказанное более характерно для наземных экосистем.

Однако не всегда экосистемам удается обособиться друг от друга. Если физико-географические условия на обширной территории меняются достаточно плавно, то GE и RN_g могут быть повсюду сходны, а упомянутые выше пограничные зоны могут и не возникнуть. В силу одинаковости природных условий взаимообмен организмами, по крайней мере некоторых видов, между разными областями ничем не ограничивается. В этом случае, как следует из вышеизложенного, вся рассматриваемая территория представляет собой сложную экосистему, и такая ситуация, как уже говорилось, особенно часто наблюдается в случае водных экосистем, нередко незаметно переходящих одна в другую, как в пространстве, так и во времени. Указанные переходы имеют иногда повторяющийся, циклический или сукцессиональный [17, 18] характер. В качестве примера для суши можно привести последовательность «тайга→→верховое болото→березняк→тайга» и т. д., которую можно проследить в различных локальных областях достаточно крупной таежной территории. Такой характер объясняется тем, что только в этом случае время истощения среды организмами, усредненное за временной промежуток много больший, чем период цикла, уравнивается с временем ее самообновления. Все это, однако, уже темы для специального рассмотрения.

* Существуют также относительно малочисленные популяции весьма специализированных видов, живущих в экотонах, которым необходимы факторы, предоставляемые обеими соприкасающимися экосистемами. Существуют также популяции видов (в частности, некоторых насекомых и птиц), периодически (например, каждый год) временно включающиеся в отдельные экосистемы и объединяющие их в экосистемы более высокого ранга, например по следующему принципу: $\rightarrow A \rightarrow B \rightleftarrows C \rightarrow I \rightarrow D \quad E \rightarrow$, где $B \rightleftarrows C$ и $D \rightleftarrows E$ — отдельные экосистемы.

6. Биогеосфера как идеальная биосистема

Любая из популяций в экосистеме связана с другими и в конкретных условиях выполняет определенные функции, что в какой-то степени напоминает разделение функций клеток при клеточной дифференцировке. В связи с этим можно говорить о наличии у экосистем «программ» взаимодействия со средой, а их самих рассматривать как самосохраняющиеся кибернетические системы, устройство которых таково, что позволяет им сохраняться в некотором диапазоне условий среды и, в частности, в различное время года [25]. Нефинальная эволюция в сложных экосистемах, приводящая к замене одних популяций другими, меняет программы, но не меняет направленности на самосохранение. Как и многие наиболее примитивные из многоклеточных организмов, экосистемы обладают свойством репрезентативности фрагментов, которое заключается в повторяемости свойств и в возможности самостоятельного существования и эволюции отдельных (не очень малых) частей этих биосистем (в связи со сказанным см. [15]). Если же изменения условий не столь значительны, что приводят к дезорганизации, то можно ожидать эволюционных изменений как в структуре и характеристиках самой экосистемы, так и в свойствах отдельных популяций. Выработка новых «программ» взаимодействия экосистем со средой осуществляется при этом вследствие отбора мутантов, выступающих здесь как источник «микрослучайностей» (см. раздел 1). Остановимся на эволюционных изменениях подробнее.

Поскольку для подавляющего большинства экосистем и биогеосферы «источником питания» является энергия Солнца, то можно попытаться связать их эволюцию с колебаниями потока энергии Солнца, доступного для усвоения растениями экосистем. При этом

следует рассматривать биогеосферу в целом, поскольку она представляет собой термодинамическую закрытую систему и в случае резкого изменения локальных условий на той или иной территории в отличие от отдельных экосистем не уничтожается целиком.

Понятно, что биогеосфера должна «запоминать» только весьма длительные упомянутые изменения, в течение которых она успеет перестроиться на новые условия. Длительность этих изменений должна быть по крайней мере больше времени жизни наиболее долгоживущих особей, умноженного на количество поколений, через которое происходит стабилизация видовых особенностей популяции (оно составляет $10^1 \div 10^2$ поколений), и поэтому больше $10^{2\div3} \times 10^{1\div2} = 10^{3\div5}$ лет. Из известных изменений близкую к полученной длительности имеют «среднепериодические» оледенения [27]. В настоящее время нет полного единства в объяснении этого явления [27—29],* однако известно, что происходят они через промежуток времени $10^{4\div5}$ лет и на время $10^{3\div4}$ лет, а колебания потока энергии, попадающей на Землю в течение лета (колебания летней инсоляции), не превышают для самых «чувствительных» широт северного полушария $10^{-2} \div 10^{-1}$ от общего потока [27, 28]. В грубом приближении можно считать, что указанные изменения в масштабе всей системы биогеосферы на порядок меньше [28] и лежат в районе значений $10^{-3} \div 10^{-2}$. Важно подчеркнуть, что для нас важны изменения не всего потока, а лишь той его части, которая используется биогеосферой, т. е. той составляющей, которая усваивается посредством фотосинтеза растениями. Для фотосинтеза же, как известно, требуется, чтобы температура среды была выше 0 °С, а также присутствие углекислого газа и воды (подробнее об этом ниже). Сказанное означает, что использовать астрофизические и геофизические данные по колебаниям потока солнечной энергии применительно к эволюции биогеосферы, не делая дополнительных расчетов, можно лишь для ориентировочных оценок.

Каким же образом причины, вызывающие оледенения вследствие уменьшения летней инсоляции, должны воздействовать на биогеосферу? Для того чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к известному из экологии факту (см. разделы 4 и 5), что в отсутствие изменений отдельные экосистемы и, следовательно, биогеосфера стремятся к квазистационарному («климаксному») состоянию. При этом их глобальная структура и характеристики потребления неизменны, несмотря на то, что в силу ограниченности времени жизни отдельных особей все время происходит подмена одних организмов другими, а в сложных экосистемах, кроме того, нефинальная эволюция видов. Иная, нестационарная картина

* Многие из современных моделей в том или ином виде используют гипотезу Миланковича [30], согласно которой оледенения — следствие периодического изменения параметров оси земной орбиты. Указанные изменения меняют длительности лета и зимы по-разному, в зависимости от широты, и приводят поэтому к колебаниям потока энергии, возможного для использования биогеосферой.

должна наблюдаться в ситуации, когда поток энергии через экосистемы уменьшается. В этом случае недостаток энергии испытывают не только растения, но и все популяции организмов, прямо или опосредованно использующих их в качестве источника питания. Понятно, что в условиях указанного дефицита питания, когда растений как источников органического вещества недостаточно (время самообновления среды для консументов больше времени ее уничтожения), преимущество в отборе получают те растительные сообщества, которые способны более эффективно использовать солнечную энергию и производить за одно и то же время большее, чем другие, количество органического вещества (см. раздел 8). Такими сообществами, очевидно, являются те, которые обладают повышенным отношением $\frac{S_{ф.п.}}{S_т}$, где $S_{ф.п.}$ — площадь фотосинтезирующей поверхности; $S_т$ — площадь тени при перпендикулярном падении солнечных лучей. Последнее отношение принято называть листовым индексом (более точное определение см. в разделе 9 и [19]). Принципиально, что поток энергии, усваиваемый растительным сообществом, пропорционален листовому индексу.

Важно отметить, что дефицит органического вещества, производимого растениями-продуцентами и обусловленный избытком потребителей-консументов, возникает в периоды оледенений также и потому, что при изменении климатических условий в наиболее невыгодных условиях оказываются не потребители, а как раз растения, поскольку они не способны передвигаться и не могут поэтому ослаблять воздействие неблагоприятных факторов среды.

Таким образом, длительное, но малое по величине уменьшение потока энергии, воздействующее на биогеосферу в тот или иной момент времени, например при условиях оледенения, приводит к увеличению листового индекса сохранившихся растительных сообществ отдельных экосистем. Эти изменения характеристик экосистем закрепляются в последующие промежутки времени, когда условия опять стабилизируются (см. раздел 5). Результатом каждого упомянутого временного уменьшения потока энергии является поэтому увеличение общего потока энергии через биогеосферу, в то время как между указанными промежутками биогеосфера находится в квазистационарном состоянии. Из этих рассуждений понятно, что предположение о биогеосфере как о биосистеме, приближающейся к идеальной, не лишено оснований, и вопрос заключается лишь в степени точности такого приближения. К нему мы еще вернемся, когда будем рассматривать числовые данные по листовому индексу.

Если принять, что биогеосфера приближается к идеальной биосистеме, то можно попытаться оценить, через какой промежуток времени должен произойти ее кризис. Действительно, хотя поток энергии через биогеосферу увеличивается после каждого прерывания, происходящего во время оледенений, однако это не может происходить бесконечно долго, и рано или поздно воз-

можности среды будут исчерпаны, а очередное прерывание (или их серия) приведет к дезорганизации как отдельных экосистем, так и биогеосферы в целом. Такого рода кризисов в истории развития биогеосферы могло быть несколько, поскольку во время них не все организмы вымирают, и поэтому возможна последующая самоорганизация новой системы биогеосферы.

В разделе 3 были приведены формулы, полученные для одинаковых и редких прерываний. Однако в случае таких биосистем, как биогеосфера, величина прерываний вследствие оледенений не постоянна, а пропорциональна общему потоку энергии через нее, и поэтому зависимости должны иметь иной вид и содержать трудноотцениваемую величину начального потока $\mathscr{E}_{\text{нач}}$, например $\mathscr{E}(t) \sim \mathscr{E}_{\text{нач}}(1+k)^{n+1}$, где n — число прерываний. Эту величину можно было бы оценить из данных по изменению $\mathscr{E}(t)$ в промежутках между кризисами, но в этом случае необходимо a priori знать, когда последние произошли, что возможно только при условии использования весьма неоднозначных (без дополнительных предположений) данных палеонтологии. Поэтому в пределах сказанного не остается ничего иного, как использовать формулу (3) для грубой ориентировочной оценки порядка величины промежутка времени между кризисами, хотя бы с целью проверки, не приходим ли мы при этом к парадоксальным результатам. Смысл такого приближения заключается в замене на некотором ограниченном промежутке времени между кризисами показательной функции $\mathscr{E}(t)$ на линейную. Поскольку во время кризиса часть организмов выживает и эволюция новой системы биогеосферы начинается уже не с момента происхождения жизни, то указанный промежуток времени должен быть меньше (но, по-видимому, того же порядка), чем промежуток времени от момента происхождения жизни до первого кризиса; последний же, исходя из упомянутого соотношения, больше $\frac{10^{4\div5}}{10^{-2\div-3}} = 10^{6\div8}$ лет ($t_{\text{нач}} \simeq 0$, неопределенность полученной величины — следствие неточности данных по параметрам оледенений — см. об этом выше). Полученный результат, разумеется, носит ориентировочный характер, и его следует расценивать только как информацию к размышлению при рассмотрении палеонтологических и геологических данных. Существует возможность и более точной оценки, основанной на установлении соответствия между периодом кризисов и изменениями листового индекса (см. раздел 8).

Сказанным не исчерпываются все те факторы, которые могут оказывать влияние на эволюцию биогеосферы. Что касается прерываний, то их причиной могут быть также те или иные катаклизмы планетарного масштаба, обусловленные геологическими и астрофизическими причинами. Последние, однако, не имеют столь многократно повторяющегося характера, хотя они могут быть причиной как незначительных эволюционных изменений, так и кризисов, особенно, когда биогеосфера находится в предкризисном состоянии.

Далее особо остановимся на другом исключительно важном факторе, влияющем на ход биологической эволюции. Таким фактором является периодическое изменение количества поступающего из недр Земли CO_2, необходимого для фотосинтеза.

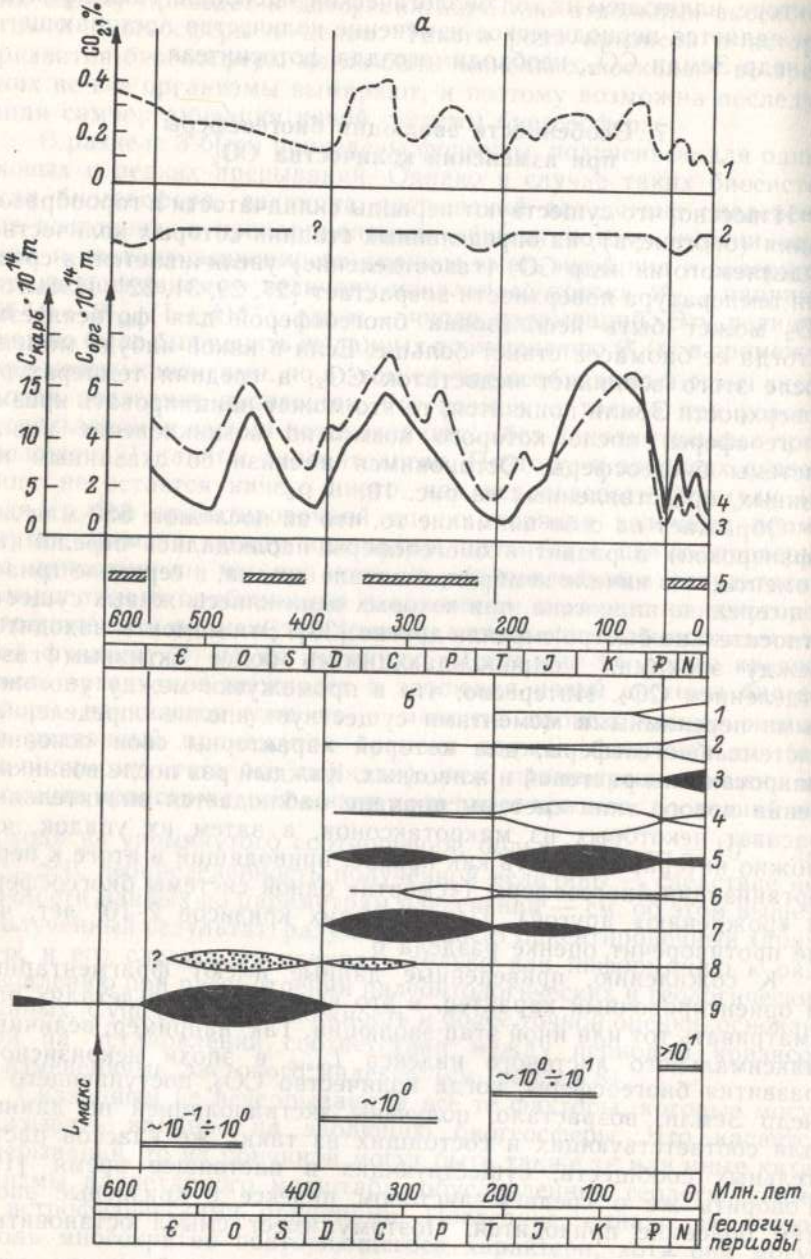
7. Особенности эволюции биогеосферы при изменении количества CO_2

Известно, что существуют периоды складчатости и горообразования (орогенеза), на определенных стадиях которых количество выделяемого из недр CO_2 (газоотделение) увеличивается, а средняя температура поверхности возрастает [27, 29, 31, 32]. Избыток CO_2 может быть использован биогеосферой для фотосинтеза, и тогда ее биомасса станет больше. Если в какой-нибудь момент после этого возникнет недостаток CO_2, а средняя температура поверхности Земли понизится, то это может инициировать кризис биогеосферы, после которого возможно возникновение новой системы биогеосферы. Остановимся в связи со сказанным на данных, представленных на рис. 10.

Обращает на себя внимание то, что за последние 550 млн лет (фанерозой) в развитии биогеосферы наблюдались переломные моменты — в начале кембрия, в начале девона, в середине триаса и в середине палеогена, при которых одни классы живых существ относительно быстро сменяли другие [33]. Эти моменты находятся между эпохами,* сопровождающимися более активным газоотделением CO_2. Интересно, что в промежутки между упомянутыми переломными моментами существует вполне определенная система биогеосферы, для которой характерны свои основные макротаксоны растений и животных. Каждый раз после возникновения нового типа системы вначале наблюдается значительный расцвет некоторых из макротаксонов, а затем их упадок, что можно интерпретировать как кризис, приводящий в итоге к переорганизации биогеосферы («смерти» одной системы биогеосферы и «рождению» другой). Период таких кризисов $2 \cdot 10^8$ лет, что не противоречит оценке раздела 6.

К сожалению, приведенные данные имеют фрагментарный и ориентировочный характер, и это не позволяет в деталях рассматривать тот или иной этап эволюции. Так, например, величины максимального листового индекса $L_{\text{макс}}$ в эпохи некризисного развития биогеосферы, когда количество CO_2, поступающего из недр Земли, возрастало, получены экстраполяцией по данным для соответствующих и состоящих из таких же классов растительных сообществ, существующих в настоящее время [19]. Говорить же о среднем листовом индексе в кризисные эпохи тем более не приходится. Поэтому имеет смысл остановиться

* Отмечают также переходные моменты в середине ордовика и мела [24, 29, 33], которые приходятся на максимумы газоотделения [31].



лишь на некоторых общих закономерностях эволюции биогеосферы с тем, чтобы увязать их с представлениями, следующими из данной модели.

В периоды, когда количество CO_2, выделяемого из недр Земли, увеличивается, а средняя температура растет, среда не накладывает ограничений на возрастание листового индекса и эволюция биогеосферы происходит по типу эволюции «идеальной» биосистемы. Биогеосфера при этом представляет собой экобиотическую систему, и после каждого прерывания средний листовой индекс для отдельных экосистем и для биогеосферы в целом увеличивается, потребление энергии продуцентами возрастает, а вслед за этим растет потребление энергии консументами и редуцентами. Виды разных трофических уровней эволюционируют «параллельно» (в силу экобиотических взаимоотношений), общая биомасса растет.

В периоды, когда количество CO_2 уменьшается, увеличение среднего листового индекса становится невозможным (для увеличения продуктивности фотосинтеза не хватает CO_2), возникает энергетический кризис, биогеосфера дезорганизуется и экобиотические взаимоотношения внутри нее нарушаются. Общая биомасса падает, а преимущество в отборе получают те продуценты, которые в этих условиях, с одной стороны, способны подавлять развитие других продуцентов и использовать освободившееся вещество, а с другой стороны, менее специализированы,* т. е. продуценты, развитие которых со стороны конкретных экосистем и биогеосферы ограничено слабее в силу того, что существование их меньше, чем других, зависит от особенностей экосистем, в которые они включены. Именно за счет таких продуцентов и возможно в первую очередь увеличение листового индекса при эволюции биогеосферы в период кризиса. Эволюция по этому типу приводит к постепенной смене одних растительно-животных сообществ другими. Изложенное позволяет говорить об ослаблении ограничений на развитие новых классов организмов в кризисные эпохи, когда экобиоз нарушен. С наступлением очередного периода увеличения поступления CO_2 новые сообщества оказываются в еще более выгодных условиях и быстро занимают главенствую-

* Например, являются пограничными для экосистем. См. также о «побежденных», как поставщике эволюционного материала [7].

Рис. 10. Характеристики биогеосферы и смены классов наземных организмов в течение фанерозоя.

а — изменения концентрации атмосферного CO_2; *1* — по Будыко [24]; *2* — по Монину [32]; *3* — карбонатонакопление $C_{карб} \cdot 10^{-2}$ — суммарная масса CO_2, погребенного в фанерозойских осадочных толщах континентов (косвенно характеризует газоотделение); *4* — $C_{орг}$ — масса погребенного органического углерода [31]; *5* — глобальные похолодания [27, с. 282—297]; *б* — история развития наземных организмов [33], ширина зон характеризует число групп, входящих в изображенные таксоны: *1* — млекопитающие; *2* — насекомые; *3* — покрытосеменные; *4* — пресмыкающиеся и птицы; *5* — голосеменные; *6* — амфибии; *7* — папоротникообразные; *8* — почвенные простейшие; *9* — водоросли; $L_{макс}$ — максимальный листовой индекс. Рисунок упрощенный.

щее положение в биогеосфере, усредненный же по всей биогеосфере листовой индекс испытывает скачок (см. раздел 8).

Следует добавить, что в эпохи усиления вулканизма возрастает не только концентрация CO_2 в атмосфере, но и количество аэрозольных частиц в ней,* что уменьшает прозрачность последней и является дополнительным фактором, влекущим за собой увеличение листового индекса растительных сообществ. Гибель некоторых из них из-за временного падения освещенности и других неблагоприятных условий, которые могут в эти эпохи иметь место, компенсируется появлением более устойчивых сообществ.

8. Эволюция биогеосферы как следствие астрофизических факторов

В некризисный период эволюции биогеосферы, когда недостатка в CO_2 не возникает, небольшие прерывания потока энергии вследствие причин, вызывающих оледенения, приводят к появлению растительных сообществ и видов растений с увеличенным листовым индексом, так как, потребляя в единицу времени больше энергии, во время прерываний они имеют преимущество в отборе. При прерываниях происходит сдвиг групповых RN_g всех видов трофических уровней вслед за сдвигом областей GE (рис. 11).

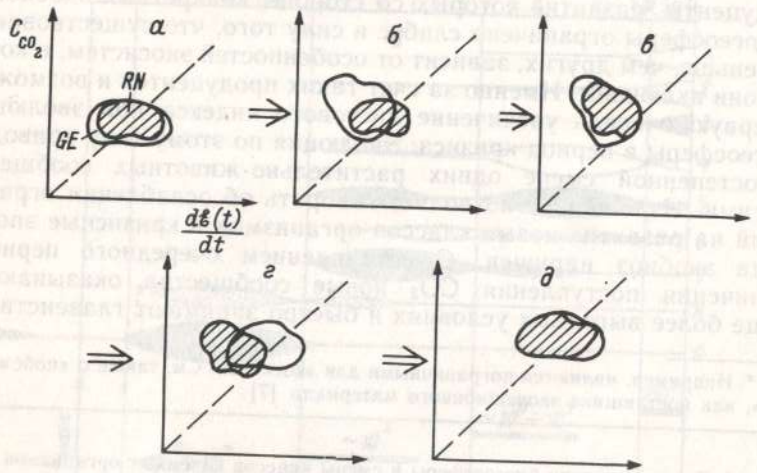


Рис. 11. Изменение RN_g продуцентов вслед за изменением области предоставляемых условий.

а — до прерывания; *б* — в начале прерывания; *в* — в конце прерывания; *г* — сразу после прерывания; *д* — через некоторое время после прерывания.

* См.: *Будыко М. И.* Аэрозольные климатические катастрофы. — Природа, 1985, № 6, с. 30—38.

В отсутствие прерываний преимущества в отборе по листовому индексу уже не наблюдаются и видовые изменения и изменения в численностях популяций закрепляются отдельными экосистемами и биогеосферой. Последняя, таким образом, увеличивает свой средний листовой индекс L в ответ на прерывания (оледенения) и сохраняет его остальное время. Она, как уже говорилось, приближается к идеальной биосистеме, и рост потребления энергии, а также листового индекса при наличии прерываний происходит у нее так, как рассмотрено выше (см. разделы 3, 7).

В эпохи, когда количество выделяемого из недр Земли CO_2 уменьшается, возникает энергетический кризис (см. раздел 7), для которого характерно нарушение экобиотических связей между частями биогеосферы, в частности через среду, вследствие постоянной «недопоставки» CO_2.

Из рис. 10 видно, что группы растений, занимающих преимущественное положение в какой-нибудь одной из систем биогеосферы, появляются уже в предыдущей. Так, например, голосеменные появились уже в эпоху, когда главенствующее положение занимали папоротникообразные (по-видимому, вначале как виды, приуроченные к иному диапазону условий). Однако в рамках старой системы биогеосферы, в которой они появились, их расцвет ограничивался всей ее структурой. После дезорганизации биогеосферы вследствие кризиса, ускоренно развивались уже голосеменные.

Новые появившиеся группы растений принципиально отличаются от старых тем, что способны в принципе обладать существенно большим, чем последние, листовым индексом, точнее, из множества новых групп в момент кризиса именно такие обладают преимуществом (см. раздел 7). Поскольку в конце кризиса, когда наступает эпоха увеличения поступления CO_2 из недр Земли и увеличения средней температуры поверхности, они оказываются в еще более выгодных условиях и быстро занимают главенствующее положение, то в результате должен наблюдаться скачок листового индекса L, что схематически изображено на рис. 12 и 13. Здесь учтено, что величина скачка ΔL пропорциональна величине L. Последнее можно пояснить следующим образом. В грубом приближении, основанном на представлении о том, что до скачка внутри растительных сообществ имело место видовое разнообразие, средний листовой индекс $L \approx \frac{L_{макс}}{2}$. После скачка видовой состав изменился в пользу видов с $L_{макс}$, откуда $\Delta L \approx \approx \frac{L_{макс}}{2} \approx L$. Данные представления можно выразить соотношением:

$$L_{кон}/L_{нач} \approx (A+1)^{N+1},$$

где A — параметр кризиса и $0 < A \lesssim 1$; N — количество кризисов; $L_{нач}$ и $L_{кон}$ — соответственно начальный и конечный листовые индексы, определенные специальным образом. По ряду соображений, на которых не будем останавливаться (они связаны с воз-

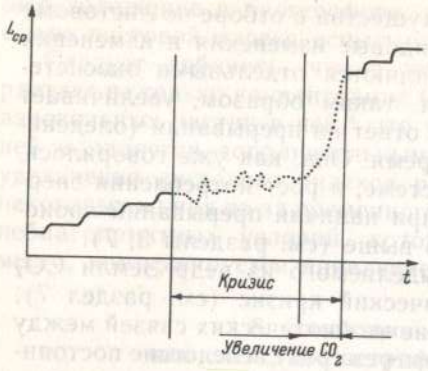


Рис. 12. Изменение среднего листового индекса $L_{ср}$ во время эволюции биогеосферы как идеальной биосистемы и во время ее кризиса.

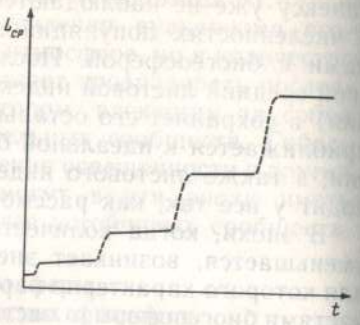


Рис. 13. Изменение среднего листового индекса $L_{ср}$ биогеосферы в течение промежутка времени, за который произошло несколько кризисов.

можностью практического использования формулы), под $L_{нач}$ в соотношении понимается средний начальный листовой индекс к моменту эволюции T_0, который характеризуется тем, что $T_0 + T = T_1$ (где T — средний период кризисов; T_1 — момент начала первого из рассматриваемых), под $L_{кон}$ понимается средний конечный листовой индекс к моменту начала $N + 1$ кризиса во время максимального расцвета системы биогеосферы, т. е. через T от начала последнего из рассматриваемых кризисов.

Из рис. 10 следует, что, начиная с кембрия, произошло три кризиса биогеосферы, и это не противоречит изложенным представлениям, данным по L и оценке $t_{кр}$, если считать, что $A \gtrsim 1$ (для суши). В принципе можно показать, что при учете влияния морской среды $A \simeq 1$.

Таким образом, во временно́м масштабе с характерными временами $10^7 \div 10^8$ лет в эволюции биогеосферы не раз имели место эпохи некризисного («прогрессивного») развития, кризисного развития и относительно короткого промежутка коренной перестройки. Последний всегда следует в конце кризисной эпохи, подготавливается характерным для этой эпохи энергетическим кризисом, при котором экобиотические взаимоотношения между частями биогеосферы и рядом популяций нарушены, и инициируется улучшением условий среды вследствие увеличения поступления CO_2. Результатом кризисов является смена одной системы биогеосферы другой, всякий раз с более эффективными продуцентами.

В более мелком временном масштабе с характерными временами $10^4 \div 10^5$ лет и в некризисные эпохи эволюция биогеосферы происходит по типу эволюции идеальной биосистемы и вызывается прерываниями при широтно-климатических изменениях, возникающих по причине колебаний параметров земной орбиты. В отсутствие прерываний имеет место нефинальная (по крайней мере,

приближающаяся к таковой) эволюция, во время прерываний преимущество получают продуценты, более эффективно усваивающие энергию из среды, главным образом солнечную.

В физическом отношении эволюция биогеосферы представляет собой такое ее изменение, при котором через нее постепенно увеличивается поток энергии и снижается уровень ее удельной энтропии. Происходит все большее накопление биогеосферой органического вещества (и, следовательно, восстановленного углерода *), а неравновесность растет. Эволюция экосистем и «прогрессивная» эволюция отдельных видов есть следствие указанной физической эволюции биогеосферы, следствие усложнения ее структуры в целом.

Энергетические кризисы, как уже говорилось, инициируются недостатком CO_2. В настоящее время имеются работы (см., например, [34, 35]), в которых прослеживают корреляции между периодами складчатости и горообразования и галактическими процессами. Дело в том, что характерный для эпох орогенеза период в $\sim$200 млн лет довольно близок к периоду обращения Солнечной системы вокруг центра Галактики. Связанные с этим проблемы, однако, еще далеки от окончательного решения, и сейчас нет недостатка в различных гипотезах, в рамках которых делается попытка объяснения цикличности эволюционных и геологических процессов. Так, например, согласно гипотезе Ривса, каждые $\sim$270 млн лет Солнечная система проходит через область галактической волны, а в работе [35] эта гипотеза ставится под сомнение. Предполагают также, что Солнце является компонентом двойной системы ** с характерным периодом взаимообращения в 26 млн лет, что существует пять циклов с периодами 285, 114, 64, 47 и 34 млн лет, тоже воздействующими на земные процессы, в частности, на положение магнитных полюсов.*** Вполне вероятно, что циклы более короткопериодические, чем двухсотмиллионные (если они действительно существуют), оказывают свое влияние на биологическую эволюцию, однако представляется, что указанное влияние имеет сравнительно частный характер по сравнению с изменением количества выделяемого из недр Земли CO_2.

Таким образом, физическая биологическая эволюция на Земле инициируется, по крайней мере, двумя факторами: масштаба Солнечной системы (колебаниями потока энергии Солнца, протекающей через биогеосферу), масштаба галактики, влияющим (пока не известно, каким образом) на интенсивность геологических процессов.

Взаимосвязь между параметрами, описывающими биологическую эволюцию и астрофизические факторы, можно установить в рамках рассмотренной модели.

---

* Указанное накопление не всегда происходит равномерно (см. раздел 10).
** В гибели динозавров виновна звезда. — В мире науки, 1984, № 6, с. 82, 83.
*** Обратимое поле. — В мире науки, 1984, № 5, с. 95.

Следует отметить, что галактические факторы могут воздействовать также и на интенсивность микроэволюционных процессов. Дело в том, что поток биологически активного гамма-излучения, приходящего к Земле и влияющего на частоту мутаций земных организмов, усиливается в спиральных рукавах галактики.* Однако микроэволюционные изменения и связанные с ними фенотипические особенности того или иного этапа биологической эволюции далеко не всегда должны приводить к глобальным экологическим последствиям. Последние могут иметь место скорее всего лишь в кризисные эпохи, в остальное же время эволюция биогеосферы как целостной системы вряд ли существенно определяется отдельными видами-«исполнителями».

Остановимся теперь на некоторых вопросах биологической эволюции, непосредственно связанных с изложенными представлениями.

9. Эффективность усвоения солнечной энергии

Как следует из изложенного, основное направление эволюции — это направление увеличения эффективности использования природных источников энергии для синтеза органического вещества. Выше был рассмотрен промежуток в последние 550—570 млн. лет, т. е. фанерозой, но не были затронуты более ранние эпохи, когда указанное увеличение могло происходить и другими способами. Можно выделить три таких способа, соответственно им в эволюции биогеосферы можно выделить три этапа.

Первый этап (архейский) — это выбор источника энергии и типа химического процесса. Очевидно, что в земных условиях наиболее богатым источником энергии является солнечная радиация, а наиболее подходящим процессом ее использования — фотосинтез. Этот этап был осуществлен в пределах надцарства прокариотных организмов, среди которых можно наблюдать значительное разнообразие типов автотрофного питания.

Как только благодаря хлорофиллу возобладал процесс фотосинтеза, началась его оптимизация — второй этап (протерозойский). Сначала она шла двумя параллельными путями: оптимизация химической стороны процесса за счет изменения набора пигментов, участвующих в фотосинтезе, и оптимизация внутриклеточного фотосинтетического аппарата. Что касается первого пути, то имеющиеся в литературе данные [36] свидетельствуют о значительном разнообразии фотосинтетических пигментов у эукариотных организмов. Однако в конечном итоге в результате эволюции лишь два варианта пигментов получили преобладание. Во-первых, это хлорофиллы *a* и *b* у эвгленовых, празиновых, зеленых и харовых водорослей и высших растений и, во-вторых, — это хлорофиллы *a*, c^1, c^2 у золотистых, гаптофитовых, желто-

* *Ленг К.* Астрофизические формулы. Т. 2, М.: Мир, 1978.

зеленых, диатомовых и бурых водорослей. Таким образом, остается заключить, что эти два набора оптимальны.

Параллельно шла эволюция ультраструктуры внутриклеточного синтезирующего аппарата [37], которая также привела к выявлению двух оптимальных вариантов ультраструктуры: одного для первой из перечисленных выше групп (за исключением более примитивных эвгленовых и празиновых) и другого — для второй. Похоже, что среди низших эукариотных организмов возможности химической и ультраструктурной эволюции фотосинтетического аппарата были на этом исчерпаны еще к фанерозою. Однако осталась еще одна не химическая, а механическая возможность интенсификации продуктивности фотосинтеза — это увеличение фотосинтезирующей поверхности на единицу поверхности Земли. Эта возможность осуществилась на третьем этапе (фанерозойском). Строго говоря, тут следует рассматривать именно фотосинтезирующую поверхность в микроскопическом смысле, однако измерять ее трудно, и поэтому в экологии употребляется лишь приближенное ее значение — листовой индекс, т. е. отношение площади листьев к площади поверхности Земли, над которой они расположены, или, что эквивалентно, — к площади тени при перпендикулярном к Земле направлении падения солнечных лучей. Нетрудно видеть, что для практических целей этот индекс более удобен, тогда как в теоретических построениях под этим названием можно подразумевать отношение точной площади фотосинтетического аппарата к площади земной поверхности, на которой он расположен.

Третий этап эволюции автотрофного обмена осуществлялся главным образом в течение фанерозоя. Еще в докембрии поверхность суши была, по-видимому, заселена одноклеточными организмами, из автотрофов в первую очередь сине-зелеными, а к девону—карбону произошло заселение равнинных участков папоротникообразными растениями. Позднее появились голосеменные и наконец покрытосеменные растения.

Принципиально, что в рамках изложенных представлений приведенные данные об увеличении эффективности использования природных источников энергии свидетельствуют о том, что эволюция продуцентов (в первую очередь растений) происходила под давлением консументов, а это означает, что с самых древних времен существуют не независимые популяции, а экосистемы. На их эволюции в историческом аспекте мы и остановимся.

10. Эволюция экосистем

Задачей этого раздела является систематизация известных эволюционных процессов, происходящих в экосистемах (о некоторых из них уже говорилось в разделах 4 и 5), на основании палеонтологических данных.

Палеонтологические материалы дают весьма много для понимания эволюции основных конструктивных особенностей наземных и пресноводных экосистем. Для познания эволюции морских

экосистем эти данные пока недостаточны, во-первых, ввиду значительной длины связей между популяциями в море (например, поверхность—абиссальные глубины), тогда как палеонтология располагает данными преимущественно о прибрежных организмах, и, во-вторых, ввиду того что значительные перестройки жизни в море произошли до начала фанерозоя и не отражены в палеонтологической летописи.

Выше говорилось о важнейших структурных и функциональных особенностях экосистем, а также о связях по существованию между отдельными популяциями и средой, например $\rightarrow A \rightleftarrows B \rightarrow$ Для описания эволюционных изменений экосистем важно конкретизировать упомянутые типы связей с тем, чтобы увязать изложенные представления с известным из экологии материалом.

Для понимания конструктивных особенностей экосистем необходимо установить: 1) какие автотрофные организмы создают органическое вещество в системе и не поступает ли оно, кроме того, извне в готовом виде (каково значение этого аллохтонного вещества); 2) из каких организмов составлены и сколь сложны цепи, приводящие к полному окислению имеющегося в системе органического вещества; 3) какова доля органического вещества, выводящегося из системы в восстановленном состоянии.

Анализ изменений конструктивных особенностей экосистем в геологическом прошлом позволяет наметить для суши следующие основные этапы:

1) архей—протерозой — органическое вещество создается и разрушается прокариотными организмами (цианеями, бактериями);

2) до середины девона (см. рис. 10) — органическое вещество создается эукариотными водорослями, а разрушается эукариотными одноклеточными организмами и далее бактериями;

3) девон—ранний мел — органическое вещество создается папоротникообразными и голосеменными, а разрушается по преимуществу грибами, диплоподами, насекомыми и олигохетами; довершают разрушение бактерии; на первых порах не вся органика подвергается деструкции, часть ее выносится из системы и захоранивается в виде угленосных отложений;

4) поздний мел—наше время — органическое вещество создается покрытосеменными, а разрушается насекомыми, моллюсками, грибами, олигохетами и бактериями.

Аналогична схема и для пресных вод, в которой намечаются те же первый и второй этапы, но на втором добавляются коловратки и листоногие раки. Третьему этапу на суше в пресных водах соответствуют два отдельных: на более раннем жизнь идет за счет бактерий, разрушающих, хотя и не полностью, приносимое с суши органическое вещество (в связи с этим изобилие двустворчатых моллюсков и, возможно, олигохет); на более позднем этапе важную роль в синтезе органического вещества начинают играть харовые водоросли. При этом формируются более древние группы водных насекомых. Наконец, четвертый

этап также совпадает с подобным ему на суше с небольшим смещением во времени. Главнейшие гетеротрофы, кроме бактерий, — это насекомые, моллюски и олигохеты (грибы в воде никогда не играли значительной роли).

Характерно, что если классифицировать экосистемы только на основании указанных конструктивных особенностей, то можно заключить, что ни одна из выделенных таким способом групп систем не исчезла с лица Земли: самые архаичные системы мы можем найти ныне в горячих источниках, в пустынях и на скалах, т. е. в наименее благоприятных условиях.

Обобщить сказанное можно в терминах эволюции круговорота углерода: каждое усовершенствование эффективности автотрофного питания (появление оформленных ядра и хроматофоров, ультраструктурное и биохимическое усовершенствование последних, формирование кроны, несущей листья) влечет за собой замедление круговорота углерода и единовременное существование все больших количеств восстановленного (органического) углерода, что в свою очередь приводит к увеличению разнообразия консументов и усложнению трофических цепей — ускорению круговорота углерода. Суммарным результатом эволюции в течение фанерозоя явилось существенное замедление круговорота. Время жизни организмов некоторых видов возросло до сотен лет, т. е. увеличилось на порядки, при относительно небольших колебаниях концентрации атмосферного CO_2.

Более мелкие (во временных масштабах) и, следовательно, более частные эволюционные изменения можно свести к трем видам процессов, часто происходящих одновременно (см. разделы 4 и 5 и [38]).

1. Дивергенционные процессы, относительно мало меняющие фундаментальные ниши FN и реализованные ниши RN видов. При этом типе процессов мало меняются также и лицензии, под которыми понимаем область фактически предоставляемых популяции условий с учетом ограничивающих факторов.

2. Интродукционные процессы, не меняющие фундаментальные экологические ниши, но резко меняющие лицензии и реализованные ниши (вплоть до нуля).

3. Диверзификационные процессы, значительно меняющие фундаментальные экологические ниши, что приводит к возникновению, выявлению скрытых, т. е. до этого не существовавших, реализованных ниш.

Первые процессы характерны для больших и относительно однородных пространств, вторые — для пограничных зон между районами с разным живым населением, третьи — для изолятов (островов, гигантских озер).

* * *

За последние 550—570 млн лет в развитии биогеосферы наблюдалась цикличность, при которой несколько раз одни классы организмов сменялись другими. Возможен подход к биогеосфере

как единой биосистеме, развивающейся в некоторых функциональных аспектах так же, как и обычные организмы. Функциональный подход к понятию жизни позволяет предложить механизм физической эволюции биосистем, что дает возможность рассматривать последние не только как биологические, но и как физические объекты.

Колебания потока энергии, протекающей через биогеосферу, стимулируют ее к физической эволюции — к увеличению потребления солнечной энергии. Уменьшение количества CO_2, поступающего из недр Земли и необходимого для фотосинтеза, в определенные периоды эволюции биогеосферы может приводить к ее кризису. Сопоставление этих двух особенностей позволяет объяснить цикличность биологической эволюции.

Прогрессивная (в обычном понимании) эволюция видов взаимосвязана с эволюцией биогеосферы. При неизменных условиях биогеосфера стремится к квазистационарному состоянию, при котором физическая эволюция ее приостанавливается, а биологическая — является нефинальной. Изложенное имеет отношение к проблеме случайности и предопределенности в эволюции: внешние факторы предопределяют ее в физическом плане, в то время как фенотипическое выражение эволюции достаточно случайно и в каждый момент времени уникально. Если бы имелась возможность неоднократного пуска эволюции «с нуля», то всякий раз фенотипический результат был бы иным [39], несмотря на подобие глобальных характеристик биогеосферы. Последнее подтверждается «параллельностью» эволюции жизни на различных континентах Земли, а также в экспериментах по моделированию микроэволюционного процесса с помощью ЭВМ [40]. Сходную в общих чертах ситуацию можно видеть и среди ряда традиционно-физических явлений. Так, например, поведение объема с газом, приближающимся к идеальному, подчиняется универсальным газовым законам и не зависит от индивидуальных траекторий отдельных частиц, как бы эти траектории сложны ни были.

Все это свидетельствует о том, что феномен жизни принадлежит миру физических явлений. Однако важно отметить, что физическое и биологическое описания этого феномена далеко не всегда можно свести друг к другу, поскольку физика и биология изучают различные характеристики и масштабы явлений, различные объекты и причинно-следственные отношения между ними. В настоящей работе предпринята попытка сблизить оба этих подхода.

Разумеется, что в данном кратком изложении многие вопросы остались не разобраны. К числу важнейших из них относятся вопросы, связанные со строгим определением понятия экосистем, с рассмотрением ряда аспектов их взаимодействия. Мало затронут также круг вопросов, касающихся проблемы локальности взаимодействия внутри экосистем, занимающих обширные территории.

Все это требует гораздо большего объема работы и обобщения обширного материала числовых данных, известных из экологии, палеонтологии, гео- и астрофизики.

Было показано, что кризисы биогеосферы синхронизированы с уменьшением газоотделения, хотя в случае неизменных условий они могли бы происходить и по внутренним причинам (см. разделы 3, 6, 8). Несмотря на кризисы и периодическую смену одних доминантных классов организмов другими, история биогеосферы представляет собой непрерывную цепь событий, биогеосфера при этом сохраняется и закономерно эволюционирует. Принципиально, что ее эволюция, так же как и эволюция биосистем более низкого ранга, есть в значительной степени следствие самосохраняющих реакций. Лишь в эпоху антропогенеза на первый план начинает выступать новый важный фактор эволюции биогеосферы: усиливающееся воздействие человеческой цивилизации, саморазвитие которой определяется не только экологией существования, но и информационным обменом (см. введение). Не означает ли изложенное, что, за исключением эпохи антропогенеза, существование и развитие жизни на Земле подчинялось принципу, который предварительно можно было бы назвать «*принципом самосохранения биогеосферы*»? По аналогии с принципом антропности (см. статью Л. Э. Гуревича настоящей книги) предлагаемый принцип можно сформулировать следующим образом: свойства отдельных организмов, свойства экосистем таковы, чтобы биогеосфера была самосохраняющейся системой. Естественно, что наличие упомянутых свойств (к ним в случае отдельных организмов следует причислить не только стремление к индивидуальному самосохранению, но, в частности, и способность к самовоспроизведению с изменчивостью) — результат постоянно действующего отбора, направленного на выживание биогеосферы. Возникновение жизни неразрывно взаимосвязано с возникновением биосферы в целом и закономерно.

В заключение авторы считают своим долгом поблагодарить М. В. Волькенштейна, Д. А. Варшаловича, В. Р. Дольника, В. В. Меншуткина и В. Н. Панибратова за ряд ценных замечаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Энгельс Ф.* Диалектика природы. — *Маркс К., Энгельс Ф.* Соч. 2-е изд., т. 20.
2. *Шкловский И. С.* Вселенная, жизнь, разум. М.: Наука, 1976.
3. *Волькенштейн М. В.* Физика и биология. М.: Наука, 1980.
4. *Волькенштейн М. В.* Биофизика. М.: Наука, 1981.
5. *Фролов И. Т.* Жизнь и познание. М.: Мысль, 1981.
6. *Платонов Г. В.* Жизнь, наследственность, изменчивость. М.: МГУ, 1978.
7. *Бауэр Э. С.* Теоретическая биология. М.; Л.: ВИЭМ, 1935.
8. *Шредингер Э.* Что такое жизнь? М.: Атомиздат, 1972.
9. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. М.: Наука, 1964.
10. *Фейнберг Е. Л.* Кибернетика, логика, искусство. М.: Радио и связь, 1981.
11. *Фолсом К.* Происхождение жизни. М.: Мир, 1982.
12. *Антомонов Ю. Г.* Моделирование биологических систем. Киев: Наукова думка, 1977.
13. *Левченко В. Ф.* Физическая модель эволюции биосистем. — Журн. общ. биол., 1984, **45**, № 2, с. 158—163.
14. *Старобогатов Я. И.* О соотношении стационарного и эволюционного аспектов в изучении живого. — В кн.: Микро- и макроэволюция. Тарту: 1980, с. 42—45.

15. *Уиттекер Р.* Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс, 1980.
16. *Трасс Х. Х.* Лишайники и их отличие от других растений. — В кн.: Жизнь растений. Т. 3. М.: Просвещение, 1977, с. 379—380. Происхождение лишайников и их место в системе растительного мира. — Там же, с. 465—466.
17. *Одум Ю.* Основы экологии. М.: Мир, 1975.
18. *Пианка Э.* Эволюционная экология. М.: Мир, 1981.
19. *Федоров В. Д., Гильманов Т. Г.* Экология. М.: МГУ, 1980.
20. *Weaver J. E., Clements F. E.* Plant ecology. New York, 1929.
21. *Эйген М.* Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М.: Мир, 1973.
22. *Эйген М., Винклер Р.* Игра жизни. М.: Наука, 1979.
23. *Тимофеев-Ресовский Н. В., Воронцов Н. Н., Яблоков А. В.* Краткий очерк теории эволюции. М.: Наука, 1977.
24. *Будыко М. И.* Изменения окружающей среды и смены последовательности фаун. Л.: Гидрометеоиздат, 1982.
25. *Пресман А. С.* Идеи В. И. Вернадского в современной биологии. М.: Знание, 1976.
26. *Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979.
27. *Джон Б.* Ледниковые периоды: поиск причин их установления. — В кн.: Зимы нашей планеты / Под ред. Б. Джона. М.: Мир, 1982, с. 38—74; Ритм, причина и прогноз. — Там же, с. 282—297.
28. *Митчелл М.* Палеоклиматические свидетельства существования солнечного цикла и его изменений. — В кн.: Поток энергии Солнца и его изменения / Под ред. О. Уайта. М.: Мир, 1980, с. 30—32; *Хейс Дж. Д.* Изменения климата и их возможная зависимость от изменения солнечного излучения. — Там же, с. 88—107; *Вернекар А. Д.* Вариации инсоляции, обусловленные изменением элементов земной орбиты. — Там же, с. 134—146.
29. *Будыко М. И.* Глобальная экология. М.: Мысль, 1977.
30. *Milancovich M.* Mathematiche Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. — In: Handbuch der Klimatologie. Bd I: A. Berlin, 1936. Перев.: Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л.: ГОНТИ, 1939.
31. *Ронов А. Б.* Вулканизм, карбонатонакопление, жизнь. — Геохимия, 1976, № 8, с. 1252—1277.
32. *Монин А. С.* История Земли. Л.: Наука, 1977.
33. *Друщиц В. В., Верещагин В. И.* Геохронологическая таблица. М.: МГУ, 1974.
34. *Багдасаров Ю. А.* Галактическая цикличность геологических процессов. — Природа, 1981, № 8, с. 57—59.
35. *Марочник Л. С.* Исключительно ли положение Солнечной системы в галактике? — Природа, 1982, № 6, с. 24—30.
36. *Ragan M. A., Chapman A.* Biochemical phylogany of the protists. New York, San Francisco, London: Acad. Press, 1978.
37. *Dodge J. D.* The fine structure of algal celles. London, New York: Acad. Press, 1973.
38. *Абросов Н. С., Ковров Б. Г., Черепанов О. А.* Экологические механизмы сосуществования и видовой регуляции. Новосибирск: Наука, 1982.
39. *Волькенштейн М. В.* Сущность биологической эволюции. — УФН, 1984, **143**, вып. 3, с. 429—466.
40. *Меншуткин В. В.* Опыт имитации эволюционного процесса на вычислительной машине. — Журн. эволюц. биохимии и физиологии, 1977, **13**, № 5, с. 545—555.

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

А. П. Александров

ВОСПОМИНАНИЯ О ПАВЛЕ ПАВЛОВИЧЕ КОБЕКО*

В феврале 1942 г. я приехал по Ладоге, по льду, в блокированный Ленинград с «Большой земли» — Н. М. Рейнов упомянул об этом во второй части своих воспоминаний. Каждого ленинградца, находившегося на «Большой земле», воевал ли он в действующей армии, был ли эвакуирован вместе со своим заводом или, как мои товарищи, вместе с институтом в тыл, чтобы работать там на оборону, — каждого мучили мысли о родном городе, о близких, о друзьях, просто о земляках, оставшихся в осаде.

В войну было трудно везде, и на фронте, и в тылу. Но все мы знали, что в Ленинграде еще труднее — так тяжело, как нигде, и наперекор всему — обстрелам, холоду, голоду, самой смерти — ленинградцы держатся и работают, чтобы выстоять. И все-таки одно — представлять себе это даже по рассказам вывезенных из осажденного города людей и по тому, что было самим испытано, но совсем другое — в полном смысле слова вдруг свалиться с неба в этот особый мир блокированного Ленинграда, где будничными деталями быта сделались стук метронома, доносившийся из репродукторов, которым предупреждали о воздушной тревоге или обстреле, рвущиеся на улице снаряды, блокадные 125 граммов хлеба и высочайший героизм людей, их повседневного труда и поступков — самых обычных, если бы условия были обычными.

Но они были чрезвычайны, условия блокады, а моих товарищей Павла Павловича и Софью Владимировну Кобеко, Валентину Абрамовну Иоффе, Бориса Докукина, Сергея Яковлевича Никитина и других я увидел истощенными, истаявшими, экономившими движения и в то же время сохранившими в себе твердость духа, ясность мысли и стремление к активной деятельности. В этой немыслимо тяжелой обстановке все они не искали легких путей, никогда не позволяли себе облегчить свою ношу за счет других. Три месяца, которые я провел тогда в Ленинграде, открыли мне совершенно новую для меня сторону людей — их способность к непрерывному подвигу.

---

* Воспоминания акад. А. П. Александрова опубликованы в виде приложений к воспоминаниям Н. М. Рейнова о П. П. Кобеко (Химия и жизнь, 1974, № 10, с. 97—99).

Сравнительно часто приходится встречаться с героическими поступками, совершаемыми под влиянием импульса, критических условий, душевного порыва, когда на короткое время все силы человека концентрируются для броска, для достижения цели во что бы то ни стало, даже ценой жизни.

Однако героизм ленинградцев во время блокады — это совершенно особый вид героизма, сформировавшийся под влиянием невероятных ежедневных трудностей блокады и позволивший полуживым людям, которыми двигала только воля, решать важные задачи обороны города, поддержки наиболее слабых, сосредоточения сил на отпоре врагу. Именно под влиянием условий, непрерывно давивших на человека, выработалась та твердость духа ленинградцев, которая потрясла весь мир.

В этих условиях проявились люди удивительной моральной силы, вокруг которых могли выстоять другие. И у Павла Павловича Кобеко эти качества были выражены с необычайной яркостью.

Павел Павлович был для всех остальных как огонь, от которого замерзшие люди впитывают тепло. Он думал только, как спасти людей, спасти других ленинградцев и отстоять город от врага. Делил с товарищами все лишения, не позволяя себе ни малейшей привилегии: все всем поровну — и тяжелый труд, и блокадная пища. Он был человеком дела и ученым каждой клеточкой своего мозга, поэтому у него, как у врача на эпидемии — через медицину, все преломлялось через физику и химию. Это знали не только физтеховцы, с которыми он жил бок о бок, и не только руководители обороны Ленинграда, с которыми он встречался по делам. Рабочие на заводах знали ученого Кобеко, который изобрел для обороны то-то и то-то и еще, сверх всего, придумал извлекать из красок льняное масло, что драгоценными капельками добавляли к их пайку. Его знали и фронтовики-артиллеристы, и солдаты, охранявшие дорогу жизни, и моряки кораблей, размагничиванием которых в Ленинграде он стал руководить после того, как эти работы возродились весной 1942 г.

Мне трудно оценить, хороши ли воспоминания старого физтеховца Н. М. Рейнова: в моей памяти — свой образ Кобеко (в памяти каждого из его друзей, сотрудников, учеников — свой образ). Что-то из рассказанного здесь о Павле Павловиче мне помнится иначе. Какие-то факты были для меня новыми, а какие-то известные мне, неизвестны автору воспоминаний.

Рейнов как бы «споткнулся» на знатном происхождении Павла Павловича, а он-то был не из знати, а из дворянской интеллигенции, и дядя его, Д. Ф. Кобеко, попал в члены Государственного совета и на картину Репина по должности — он был директором Публичной библиотеки, ученым — историком и экономистом. Сам Кобеко к своему происхождению относился иронически. Увидит, как мы переводим с английского статью, скажет: «Дайте-ка посмотреть недорезанному буржую». И на должности сторожа он оказался вначале не оттого, что его иначе не зачислили бы

Павел Павлович Кобеко (1897—1954).

в Физтех. Просто некоторое время не было другой вакантной должности. Работал-то он всегда как научный сотрудник.

Но так или иначе Рейнов сделал важное дело: он без прикрас рассказал то, что знал о нашем друге и замечательном ученом — и о молодости, и о его «звездных часах», и о житейских сложностях, выпавших в последние годы ему, человеку очень тонкому, доброму и чуткому.

Это непременно нужно было сделать: память о таких людях, как он, — чистых, бесконечно преданных науке, истине, человечности, гражданскому долгу, своей родине — должна служить примером для тех, кто начинает свой жизненный путь.

В очень тесном содружестве с Павлом Павловичем Кобеко я работал много лет. Он отличался необычайной расположенностью к людям, живым интересом и к своей работе и к работе других. Совет и самая доброжелательная помощь с его стороны

10 Заказ 1006

и сотрудникам Института, и студентам, и многочисленным производственным предприятиям и лабораториям входили в норму его отношения к людям и делу. Он совершенно не считался с затратой своего времени и труда, когда чувствовал, что может чем-то помочь в работе других. Когда я начал работать в Физтехе, мне понадобилось натянуть нить в электрометре, и я обратился к Павлу Павловичу, с которым еще не был знаком, за помощью. Он проводился со мной два часа, научил меня, как травятся нити, и не отходил от меня, пока я не кончил работу. Такой первый контакт перерос в длительную дружбу. У Павла Павловича, человека удивительно живого творческого ума, ученого с широким кругозором и энциклопедическими знаниями, никогда не проявлялось даже следов какого-либо высокомерия, с кем бы он ни общался. Он был очень общителен, всегда весел, ему легко удавалось для решения какой-либо задачи организовать сотрудничество с вузовскими и заводскими лабораториями, с другими институтами, и всегда он был душой и руководителем в каждом новом деле. Работать с ним было радостно — шутки, розыгрыши уживались в нем с глубокой серьезностью в науке. Он любил делать и работы прикладные. Например, мы с Павлом Павловичем вместе с сотрудниками завода синтетического каучука в 30-х годах разработали способ повышения морозостойкости синтетических резин, который пошел в производство.

Его фундаментальные исследования в области релаксационного механизма перехода в стеклообразное состояние до сих пор являются основой наших представлений в физике аморфного состояния. Школа Кобеко в этой области была ведущей. Работы Павла Павловича и его сотрудников в области механических свойств аморфных тел привели к психологическому сдвигу в области представлений о механических свойствах твердых тел вообще. Подход к этим свойствам не с позиций идеального кристалла, а с позиций учета роли нарушений в нем позволил создать современные дислокационные представления процесса разрушения. Фундаментальный вклад П. П. Кобеко и его школа внесли и в понимание электрических свойств аморфных тел и пластмасс, и в физику сегнетоэлектриков.

Обаяние Павла Павловича покоряло всех. Я помню, как под окно лаборатории прибежал мой сынишка, ему было лет шесть. Он кричал мне: «Иди скорее домой, к нам пришел наш любезный дядя Кобеко!». С Павлом Павловичем постоянно случались всякие комичные события. Например, однажды, когда один из его студентов заболел и попал в психиатрическую больницу, Павел Павлович решил поговорить с лечащим врачом, пришел туда и сам вызвал у молодого врача подозрения своей рассеянностью. Тот сейчас же спросил Кобеко, какой сегодня день и год, и Павел Павлович назвал прошедший день и прошлый год. Тогда врач спросил, где он работает, и Кобеко назвал себя сотрудником А. Ф. Иоффе. Психиатр был уже совсем убежден, что имеет дело с больным, и чуть было не задержал Павла Павловича, а потом оправдывался

тем, что все его пациенты «всегда ссылаются на всяких высоких личностей. . .». А как-то Павел Павлович с И. В. Курчатовым получили гонорар за книгу, около 2000 руб. Они решили дать женам по 700 руб., а остальные «заначить», — и так и сделали. Но умная и острая Зося (Софья Владимировна, жена Кобеко) немедленно позвонила Марине (жене Курчатова) и спросила: «Сколько тебе дал Игорь денег за книгу? Семьсот? А в каком виде?». — «Одна пачка 500 руб. запечатанная, а вторая пачка неполная, в ней 200 руб.», — ответила Марина. — «Ах, так, значит, они замотали по 300 руб., у меня тоже одна пачка целая, а другая неполная. Почему бы им в кассе, выдавая 1400 руб., дали в четырех 500-рублевых пачках?».

Когда мужья пришли домой, обе жены твердо стали требовать с них по 300 руб. Эти эпизоды, как и множество других, постоянно со смехом обсуждались в институте.

За свою самоотверженную работу во время блокады Павел Павлович был награжден высшей наградой — орденом Ленина. Награждены были и многие другие сотрудники: М. В. Гликина, Ф. И. Марей, Софья Владимировна, жена Кобеко. Валентина Абрамовна Иоффе была награждена дважды — орденом Знак Почета за работу в институте и орденом Красной Звезды за работы по противоминной защите кораблей. Под постоянным обстрелом она с группой моряков пробиралась на катере в Кронштадт, часто вела работу в обстреливаемых и бомбардируемых районах. . .

Однако блокада подорвала силы всех, переживших ее. А после блокады прежний стиль работы и жизни в Физтехе не был восстановлен. Загруженность работой в области атомной тематики и ее известная специфика поневоле разобщили всех нас, а кроме того, сначала Курчатов и Алихановы, а потом и многие другие сотрудники уехали в Москву. Вскоре и я был переведен туда же.

Встречаться мы стали редко. Обстановка в Физтехе осложнилась, работы по полупроводникам были выделены из Физтеха, и вместе со многими сотрудниками наш общий учитель и руководитель академик А. Ф. Иоффе должен был покинуть Физтех (ныне Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе). Абраму Федоровичу была поручена организация нового Института полупроводников АН СССР. П. П. Кобеко тяжело переживал все эти перестройки. Его здоровье, подорванное блокадой, резко ухудшилось. Окончательно подкосила его внезапная смерть жены, Софьи Владимировны, от белокровия. После этого Павел Павлович уже не оправился, и скоро мы его потеряли.

В суматохе тех страшно бурных, напряженных и полных потерями лет Павел Павлович был почти забыт, и лишь сейчас, когда время оставило в памяти только самых выдающихся, мы все чаще вспоминаем светлого, умного, творческого человека — П. П. Кобеко.

В. Я. Френкель

МАТЕРИАЛЫ К БИОГРАФИИ ПАВЛА ПАВЛОВИЧА КОБЕКО

Павел Павлович Кобеко принадлежит к числу наиболее ярких представителей ленинградской физической школы. Он внес большой вклад в развитие физики сегнетоэлектриков, физики аморфного состояния и высокомолекулярных соединений. В нем счастливо соединялись способности химика и физика, исследователя и инженера, всегда думавшего о приложении выполненных им работ к нуждам практики, промышленности. К этому следует добавить исключительно высокие человеческие качества, которые привлекали людей к Павлу Павловичу. С особой силой они проявились в годы тяжких испытаний, в годы войны, когда Кобеко возглавил ленинградский филиал Физико-технического института — основная масса его сотрудников в июле—августе 1941 г. была эвакуирована в Казань.

Небольшая группа физиков, объединившаяся вокруг Кобеко, сделала необычайно много для блокированного города и фронта. Филиал Физико-технического института оставался в осажденном городе научным центром, к которому тянулись физики из других научно-исследовательских институтов и вузов.

Представляется удивительным, что о П. П. Кобеко пока что еще почти ничего не написано.* Настоящая публикация ставит своей целью ознакомить читателей с некоторыми материалами его биографии, почерпнутыми из Архива ФТИ.

В личном деле П. П. Кобеко № 1041, начатом 1 марта 1925 г. и оконченном 1 ноября 1952 г., имеется несколько его автобиографий. Начнем нашу публикацию той из них, в которой наиболее подробно описываются первые, еще дофизтеховские годы.

Автобиография Павла Павловича Кобеко

Мой отец служил нотариусом в г. Вильно, где я и родился в 1897 г., 11 июня. Десяти лет я поступил в мужскую гимназию и пробыл в ней до эвакуации Вильно в 1915 г. После этого я перевелся в Мстиславскую мужскую гимназию и окончил ее в 1917 г. в мае. В июне 1917 г. я был мобилизован в армию, но в июле у меня обнаружили туберкулез в активной форме и в сентябре 1917 г. я был демобилизован. В 1918 г. я поступил в Мстиславский Наробраз, где я работал секретарем школьного подотдела. В 1919 г. вступил в профессиональный союз Рабпроса. В этом же 1919 г. я перешел в Кудричскую школу I ступени Мстиславского района, где я работал в качестве учителя до 1921 г.

* Исключение составляют воспоминания Н. М. Рейнова [1] и послесловие к ним А. П. Александрова, опубликованное в настоящем сборнике.

В 1921 г. я поступил в Горецкий сельскохозяйственный институт (Белоруссия), который я окончил в 1924 г. Одновременно с этим я работал [там]. В 1922 г. я был принят лаборантом в лабораторию органической химии. С конца 1922 г. и в 1923 г. я был зачислен научным сотрудником и вел практику по органической химии со студентами института. В середине 1923 г. в институте организовалась научно-исследовательская лаборатория по агрономической химии. Я был приглашен в эту лабораторию и перешел в нее в качестве научного сотрудника. Я участвовал в ее организации и провел в ней ряд исследований по агрохимии и физической химии. В этот же период мною была налажена регенерация ряда дефицитных реактивов. После окончания института в 1924 г. мне было предложено остаться при институте в качестве сотрудника лаборатории. Однако в это время основные научные вопросы, которыми я интересовался, были мало связаны с общим направлением поставленных работ в данной лаборатории. Уже в 1923 г. я стал особенно сильно интересоваться физикой и работал одновременно лекционным демонстратором при кафедре физики.

В конце 1924 г. я уехал в Ленинград и был принят в Ленинградский физико-технический институт в лабораторию физической химии, в которой работал в качестве научного сотрудника до конца 1925 г. В этот период мне было поручено исследование полимеризации высыхающих масел и исследование электрических свойств получаемых полимеров, а также изучение электропроводности борных стекол.

В 1926 г. академик А. Ф. Иоффе пригласил меня в свою лабораторию для работы по изучению диэлектриков. С этого времени вся моя дальнейшая исследовательская работа сосредоточилась на изучении физики твердого тела. До 1933 г. я в основном занимался изучением электрических свойств твердых тел, а с 1933 г. организовал лабораторию изучения аморфного состояния, которой руковожу и в настоящее время. В 1930 г. я начал чтение курса физико-химических свойств диэлектриков в Индустриальном институте * в качестве доцента, а с 1933 г. — в качестве профессора.

Весной 1935 г. я защитил докторскую диссертацию на тему: «Аморфное состояние». 5 сентября 1933 г. был утвержден ВАКом действительным членом ЛФТИ, в 1935 г. — доктором физико-математических наук и профессором по ЛИИ.

За время своей работы в ЛФТИ я неоднократно премировался институтом, а в 1933 г. получил премию НИС Наркомтяжпрома за работы по исследованию сегнетоэлектричества.

В 1926 и в 1934 гг. работал членом месткома ЛФТИ.

Со времени эвакуации ЛФТИ в Казань я оставлен научным руководителем ленинградского филиала ЛФТИ.** С этого времени

* Ленинградский политехнический институт (ЛПИ) некоторое время назывался Индустриальным институтом (ЛИИ).

** По представлению А. Ф. Иоффе 31 марта 1943 г. ленинградская группа научных сотрудников ФТИ стала называться Филиалом института.

руковожу всеми научными оборонными работами ЛФТИ в г. Ленинграде, ведущимися по заданию Военного Совета и Горкома ВКП(б).

Согласно постановлению Горкома ВКП(б), я являюсь членом Комиссии по реализации оборонных работ при Горкоме.

25 августа 1942 г. П. Кобеко

Архив Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР, д. 1041, л. 72—74.*

На последнем листе машинописной копии рукой П. П. Кобеко сделана приписка: «В 1942 г. премирован Президиумом Акад. наук СССР за выполнение Ленинградским филиалом ЛФТИ оборонных работ.

21 VI 1942 г. получил благодарность зам. пред. Совнаркома СССР т. Первухина за выполненные в Лен. филиале ЛФТИ научные работы».

В Ленинградском отделении Архива АН СССР (ф. 968, оп. 1, ед. хр. 16, л. 1) хранится диплом об окончании П. П. Кобеко Горецкого сельскохозяйственного института и получении звания «ученого агронома». П. П. Кобеко прослушал «полный курс наук по секции растениеводства агрономического отделения института». Этот курс состоял из 32 предметов, примерно одну треть которых составляли естественные и точные науки (высшая математика, физика, неорганическая и органическая химия, метеорология, кристаллография и минералогия, почвоведение, геодезия). Вторая треть преподававшихся предметов может быть отнесена к биологии, понимаемой в широком смысле слова, включая сюда зоологию, энтомологию, ботанику и т. д.; последнюю треть составляют сельскохозяйственные науки. Кроме того, Павел Павлович, если принять во внимание его будущую профессию, сдал (в дополнение к 32) экзамены по ряду «экзотических» специальностей. В их числе были селекция и семеноводство, луговодство и культивация болот, льноводство, огородничество, садоводство и т. д. Не случайно в первой половине 30-х годов А. Ф. Иоффе привлек П. П. Кобеко к организации Агрофизического института и постановке в нем физических исследований! А курсы овощеводства и огородничества, возможно, помогли Павлу Павловичу в 1942—1944 гг. наладить для сотрудников филиала ФТИ огородное хозяйство.

В Архиве ФТИ сохранилась копия справки, выданной в октябре 1921 г. мобилизационным отделом Мстиславского уездного Военного комиссариата, о том, что П. П. Кобеко «на основании телеграммы Смоленского губернского военкомата за № 1597, как родившийся в 1897 г., увольняется в бессрочный отпуск и объявляется трудмобилизованным по должности шкраба,** что и удостоверяется» (л. 19).

* В дальнейшем в конце документов будут проставляться только страницы (листы) дела.

** Шкраб — школьный работник.

П. П. Кобеко начал учительствовать двумя годами ранее, сначала в Мстиславской, а затем в Кудричской советских школах. Интересно, что преподавал он не химию и не физику, к которым испытывал влечение еще с гимназических лет, а французский и немецкий языки. Родители П. П. Кобеко, Павел Фомич, бывший нотариусом в Вильно, и Елена Ивановна, дали сыну прекрасное воспитание. Помимо французского и немецкого, он свободно владел и английским языком. Как справедливо заметил А. П. Александров в своих воспоминаниях, Павел Павлович происходил из среды дворянской интеллигенции. Мать Павла Павловича, которую помнят его сослуживцы по ФТИ, была очень умной и простой в обращении с людьми женщиной. Его дядя, Дмитрий Фомич Кобеко — член-корреспондент Российской Академии наук, видный историк, экономист, пушкинист, автор и сегодня не забытых пушкиноведческих работ, страстный библиофил. По свидетельству Словаря Брокгауза и Ефрона, у него была одна из лучших в России частных библиотек. Не случайно поэтому, что Д. Ф. Кобеко в 1902 г. стал директором Публичной библиотеки в Петербурге. От родителей Павел Павлович унаследовал высокую культуру и необыкновенный демократизм во взглядах и в поведении. В жизни П. П. Кобеко, естественно, бывали трудные моменты и периоды, но он был человеком сдержанным и не допускал, чтобы его настроения оказывали влияние на ежедневные контакты с сотрудниками, учениками, студентами. Именно поэтому он вспоминается неизменно веселым, улыбающимся, мастером и ценителем хорошей шутки. И вместе с тем он всегда умел находить твердые и жесткие слова, когда ему приходилось отстаивать истину — научную или гражданскую, защищать ее от несправедливых нападок. Это очень ясно видно из просмотра стенограмм заседаний Ученого совета ФТИ конца 40-х—начала 50-х годов, когда Павлу Павловичу часто приходилось выступать в защиту своего учителя А. Ф. Иоффе. Стремление оказать помощь и поддержку были органически присущи этому замечательному человеку.

П. П. Кобеко пришел в ФТИ в момент, когда в институте произошли существенные организационные преобразования. По инициативе А. Ф. Иоффе, Н. Н. Семенова, А. А. Чернышева и др., поддержанной руководящими органами, в самом конце 1924 г. была создана самостоятельная Государственная физико-техническая лаборатория,* подчиненная Совнархозу (ФТИ находился в то время в подчинении Наркомпроса). Совнархоз мог в отличие от Наркомпроса предоставить большие средства для финансирования работ по внедрению достижений физики в промышленность. Соответствующие исследования возглавили в лаборатории руководящие сотрудники ФТИ, сохранив за собой

* В разное время она называлась по-разному: Центральной ФТЛ, Ленинградской ФТЛ. В дальнейшем мы сохраним за ней это наиболее устойчивое название.

соответствующие должности и обязанности по институту.* Исследования прикладного характера сосредоточивались в нескольких отделах лаборатории. Имеющиеся средства позволили принять на работу в ЛФТЛ новых исследователей, в том числе и студентов физико-механического факультета Политехнического института, которые заканчивали курс обучения. К середине декабря 1924 г. в ЛФТЛ насчитывалось 5 отделов, среди них и физико-химический. Его возглавил С. А. Шукарев. На заседании Коллегии ЛФТЛ — органа правления лаборатории, состоявшемся 11 апреля 1925 г., заведующий физико-химическим отделом ЛФТЛ ** говорил о «необходимости иметь сотрудника для означенного отдела, на каковую должность им рекомендуется Кобеко». Коллегия постановила: «Пригласить Кобеко с 1 апреля в качестве ассистента с выдачей ему вознаграждения в размере 30 рублей в месяц» (ф. 2, оп. 1, ед. хр. 1, л. 11/об.).

Сопоставляя указанные Павлом Павловичем в разных документах даты его поступления в ФТИ (конец 1924 г.—начало 1925 г.) с приведенными выше (1 апреля 1925 г.), можно думать, что дело обстояло следующим образом. На время, пока под запланированные штаты ЛФТЛ не были отпущены соответствующие средства, Кобеко был взят в ФТИ, как гласят устные легенды, в качестве лабораторного служителя или сторожа. 1 октября 1925 г. он стал научным сотрудником II разряда. Физико-химический отдел занимался подбором изоляторов для высоковольтного аккумулятора, который в то время разрабатывал А. Ф. Иоффе и его сотрудники, в том числе К. Д. Синельников и И. В. Курчатов. П. П. Кобеко занимался получением и испытанием тонких пленок, лаков и других материалов, которые должны были обладать большим пробивным напряжением. Обширные химические познания и экспериментальное мастерство молодого человека привлекли к нему внимание А. Ф. Иоффе, в лабораторию которого в ФТИ он вскоре и был переведен.

В Архиве имеется обширная научная характеристика, дающая детальный обзор научной деятельности и достижений П. П. Кобеко. Она подписана директором ФТИ А. Ф. Иоффе, которого Павел Павлович считал своим учителем, причем подпись свою А. Ф. Иоффе поставил за два дня до начала войны — в пятницу 20 июня 1941 г.

Характеристика

Павел Петрович Кобеко — профессор, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией ЛФТИ, действительный член института.

---

* Ситуация, таким образом, напоминает ту, которая сложилась сейчас в вузах, где преподаватели ведут еще научно-исследовательские работы.

** В некоторых документах он фигурирует как химический отдел, а иногда и химический подотдел физического отдела, которым руководил А. Ф. Иоффе.

Самостоятельную научную работу начал в 1924 г. в качестве сотрудника Ленинградской физико-технической лаборатории, в лаборатории акад. А. Ф. Иоффе. Уже в первый период научной деятельности, в 1924—1930 гг., П. П. Кобеко стал одним из видных представителей советской физической школы, ставившей себе задачу изучения электрических свойств диэлектриков.

Исследования П. П. Кобеко этого периода посвящены изучению механизма электропроводности твердых диэлектриков и полупроводников, а также механизма электрического пробоя. Эти исследования, будучи неразрывным звеном в цепи работ всей школы, имели большое значение в развитии современной физики диэлектриков и полупроводников. Работа, проведенная совместно с И. В. Курчатовым и К. Д. Синельниковым и посвященная выяснению механизма выпрямления сернистых солей, положила начало изучению полупроводников в Советском Союзе. Изучение ионной проводимости стекол в больших электрических полях явилось первой попыткой определения механизма прохождения токов, обусловливающего наступление электрического пробоя. П. П. Кобеко совместно с И. В. Курчатовым на примере рентгенизированной каменной соли впервые доказали, что тепловой пробой может быть обусловлен как ионной, так и электронной проводимостью. В результате изучения причин понижения электрической прочности со временем, проведенного П. П. Кобеко совместно с И. В. Курчатовым и К. Д. Синельниковым, установлено вредное влияние поверхностного разрушения диэлектрика и обнаружено существование процессов, возникающих в самом диэлектрике под влиянием высоких электрических полей и меняющих структуру материала.

В 1930—1932 гг. П. П. Кобеко совместно с И. В. Курчатовым начали исследование диэлектрических свойств сегнетовой соли. Эти работы явились одной из блестящих страниц в истории советской физики. В этих работах было выработано понятие о сегнетоэлектричестве как о явлении, аналогичном ферромагнетизму. Были прослежены все основные закономерности и доказано наличие явления спонтанной ориентации. Эти работы привлекли внимание широкого круга работников в области физики и электротехники как внутри СССР, так и за границей. Дальнейшее изучение сегнетоэлектриков проводилось И. В. Курчатовым и его учениками. Разработка вопросов, связанных с техническим применением сегнетовой соли, проводилась в ЦРЛ (Центральная радиолаборатория, — *В. Ф.*) под руководством проф. В. П. Вологдина — одного из соавторов основного патента. Ныне сегнетова соль нашла в электротехнике — как отечественной, так и заграничной ряд технических применений.

Деятельность П. П. Кобеко как работника Физико-технического института не могла быть ограничена рамками чисто физического изучения вопросов. Уже в 1925 г. П. П. Кобеко принимал участие в организации работы в исследовательских лабораториях заводов электроизоляционной промышленности (в частности, завода Севкабель), консультировал работников электро-

промышленности, участвовал в ряде конференций и совещаний по изолирующим материалам, руководил проведением ряда лабораторных исследований, имевших непосредственное техническое значение.

В качестве примера можно указать работу, проведенную по заданию завода «Красный треугольник», по установлению причины низкой прочности листового эбонита малых толщин, затем работу по выяснению стойкости в парах аммиака различных родов изоляции проводов (задание ВИЭСХа), исследование электрических свойств кварца, изготовляемого заводом им. М. В. Ломоносова, и т. д. Эта сторона деятельности заставила П. П. Кобеко практически ознакомиться не только со свойствами ряда технических изолирующих материалов, но и с тайнами их технологии.

В 1930 г. П. П. Кобеко был приглашен преподавателем в Ленинградский индустриальный институт (ныне Политехнический институт) на инженерно-физический факультет для чтения самостоятельного курса «Физико-химия диэлектриков». В 1936 г. ему присвоили звание профессора.

В 1932 г. начинается наиболее важный и наиболее плодотворный период деятельности П. П. Кобеко — он выступил как вполне самостоятельный, сформировавшийся, крупный ученый.

Выдвинутая П. П. Кобеко концепция аморфного состояния позволила ему в первую очередь создать «Физико-химические основы диэлектриков» — книгу, единственную в этой области знаний во всей мировой литературе. Она явилась необходимым дополнением к курсу, который П. П. Кобеко читал в ЛИИ. В результате многолетней работы П. П. Кобеко в качестве профессора инженерно-физического факультета ЛИИ у него появилось много учеников среди работников изоляционной промышленности и соответствующих исследовательских институтов. Этому способствовало то, что П. П. Кобеко много лет являлся консультантом в изоляционном секторе ЛЭФИ (лаборатория А. Ф. Вальтера). Он был не только идейным вдохновителем, но подчас руководителем ряда работ непосредственно технического значения. В настоящее время П. П. Кобенко — признанный авторитет в вопросах изоляции. Вместе с А. Ф. Вальтером, М. М. Михайловым П. П. Кобеко является одним из создателей советской школы работников технической физики, вышедших из стен ЛПИ и работающих в изоляционной промышленности. Работа представителей этой школы привела к получению важнейших технических результатов по созданию и улучшению свойств ряда изолирующих материалов.

В 1932 г. П. П. Кобеко организовал в стенах Ленинградского физико-технического института Лабораторию аморфного состояния. К 1941 г. лаборатория П. П. Кобеко оказалась в центре уже целой группы лабораторий. Таким образом, была создана советская школа молекулярной физики, работающая над вопросами аморфного состояния как мономерных веществ (переохлажденных жидкостей, стекол), так и полимеров (пластиков, каучукоподобных веществ и резины).

В области изучения физических свойств полимеров как аналогов переохлажденных жидкостей П. П. Кобеко является пионером не только советской, но и мировой науки.

После защиты диссертации на тему «Аморфное состояние» в 1935 г. П. П. Кобеко была присуждена степень доктора физико-математических наук.

Совершенное владение физикой диэлектриков, физико-химией аморфных тел, исключительная физическая интуиция, выработанная многолетней исследовательской деятельностью, позволили П. П. Кобеко выступить с точкой зрения, объединившей как физические (электрические, механические, тепловые и др.), так и физико-химические свойства аморфных тел. В отличие от существующей в ряде школ у нас и за границей практики изолированного изучения отдельных свойств аморфных тел П. П. Кобеко направил исследование на комплексное изучение свойств, на всестороннее освещение механики аморфного состояния.

Исследования, проведенные П. П. Кобеко (им самим и под его руководством в его лаборатории в ЛФТИ), вначале были посвящены изучению аморфного состояния мономерных (низкомолекулярных), а затем и полимерных (высокомолекулярных) веществ. Эти исследования подготовили успешное изучение полимеров, проводимое ныне в ЛФТИ уже несколькими лабораториями. Эти исследования показали, что развитие релаксационных процессов является основной чертой аморфного состояния и что скорости различных релаксационных процессов по своей природе тесно связаны между собой. Различные вещества отличаются в первую очередь областями температур, где релаксационные процессы достигают заметного развития. Эти области температур ограничены снизу T_g — температурой застеклования (размягчения) — характеристикой скорее технологической, чем физической. Ниже релаксационные процессы идут настолько медленно, что в повседневной технической практике состояние вещества считается твердым, упругим и пластически недеформируемым.

Работы П. П. Кобеко и его школы показали, что область технического применения различных материалов определяется положением T_g. Материалы, у которых T_g лежит выше области рабочих температур, используются в качестве конструктивных (стекла, пластики); материалы, у которых T_g лежит ниже рабочих температур, используются как смазки, компаунды (мономеры) и как пластики (полимеры). Выше T_g все полимеры по эластичности являются аналогами каучуков. Но высокая эластичность технически используется только у таких полимеров (резин, каучуков), у которых T_g лежит ниже комнатных температур.

Наряду с изменением химического строения полимеров, важнейшим техническим способом управления положением T_g является пластификация. В работах П. П. Кобеко и его учеников были выяснены физические закономерности пластификации.

Эффективность работы самого П. П. Кобеко в области решения промышленных задач много способствовала перестройке работы

ЛФТИ, начавшейся в 1936 г. Последовавшее образование целой группы лабораторий позволило резко увеличить продуктивность работы в направлении приложения теоретических концепций школы П. П. Кобеко для решения технических задач, выдвигаемых народным хозяйством СССР. Так, работая совместно с заводом синтетического каучука, П. П. Кобеко, руководствуясь определенными теоретическими соображениями, в кратчайший срок разрешил проблему морозостойкости резины СКБ, и это достижение уже используется нашей промышленностью. Оно принесло П. П. Кобеко признание ценности его концепций в кругах работников резиновой промышленности.

В последние годы П. П. Кобеко предпринял ряд исследований, имевших целью установление связи между химическим строением мономера и физическими свойствами получаемых из него полимерных продуктов. Эта задача — одна из центральных в учении о высокомолекулярных веществах.

Изучение кинетики полимеризации и деполимеризации показало, что рассмотрение строения полимеров только в связи с кинетикой их образования неполноценно. В действительности при проведении полимеризации может наступить химическое равновесие между продуктами «сшивания» и продуктами распада (мономером). Из стирола и метилметакрилата, например, можно получить образцы, строение которых однозначно определяется условиями, при которых было достигнуто равновесие.

Обобщение громадного экспериментального материала по изучению физических свойств продуктов полимеризации, полученного как в лабораториях, работавших или непосредственно под руководством П. П. Кобеко, или в тесном контакте с ним, так и на основании литературных данных, позволило выяснить влияние химической природы полимерных образований на их теплостойкость и на их диэлектрические свойства. Оказалось, что насыщенные линейные углеводороды обладают температурой размягчения T_g, лежащей ниже 0 °С. Эти продукты являются поэтому искусственными каучуками и могут быть использованы как эластики. Наличие радикалов, увеличивающих межмолекулярное взаимодействие, влечет за собой повышение температуры размягчения тем большее, чем выше объемная концентрация этих активно действующих радикалов.

Все чистые неполярные углеводороды являются высококачественными изоляторами. Диэлектрические потери у них ничтожны как в области ниже T_g, так и в высокотемпературной области, где они уже эластичны. Повышения теплостойкости без ухудшения диэлектрических свойств можно добиться лишь путем создания пространственного полимера (эскапона) или путем введения в номер активного, но неполярного радикала. Наличие полярных групп или даже полярного пластификатора неминуемо создает заметные диэлектрические потери при всех температурах.

Параллельно с исследованиями принципиального характера П. П. Кобеко руководит работами непосредственного прикладного

значения. На основе проведенного изучения температурной зависимости вязкости жидкостей, полимерных растворов удалось создать состав высокой вязкости с температурным коэффициентом вязкости, в сотни раз меньшим, нежели соответствующий коэффициент смазочных масел. Тем самым была решена задача обеспечения работы при низких температурах ряда механизмов.

В работе, проведенной совместно с ЛПИ, удалось создать изоляционный материал с ничтожнейшим температурным коэффициентом емкости ($\alpha \leqslant 10^{-6}$ град.$^{-1}$).

Была разработана технология новой высококачественной пластмассы «эскапон», производство которой подготавливается на ряде заводов.

П. П. Кобеко — крупнейший специалист в ряде вопросов, является одновременно и физиком, и физико-химиком, и химиком. Колоссальная эрудиция, большая интуиция в разрешении научных и технических проблем, исключительная работоспособность и инициатива создали ему авторитет среди специалистов в области физики, технической физики, физической химии, электроизоляционной, резиновой, оптической промышленности и промышленности пластических масс.

П. П. Кобеко — достойный кандидат в члены-корреспонденты Академии наук СССР. Избрание П. П. Кобеко откроет ему широкое поле практической деятельности, направленной к поднятию нашей промышленности пластмасс и полимеров на высший уровень, что является ныне прямой задачей Академии наук. Его избрание укрепит работу всей школы и будет стимулировать работников к дальнейшим научным достижениям и обяжет усилить участие в строительстве социализма в нашей стране.

20 VI 1941 Академик А. Ф. Иоффе

Архив, л. 56—65.

Возвратимся к раннему периоду биографии П. П. Кобеко. Он начал работать с И. В. Курчатовым и К. Д. Синельниковым, пришедшими в ФТИ примерно одновременно с ним: Синельников — несколько раньше, Курчатов — несколько позже. Первые работы Павла Павловича были выполнены им совместно с Игорем Васильевичем: для обоих они были первыми «физтеховскими». Наиболее существенными из этих работ Кобеко считал исследования механизма электропроводности диэлектриков, их электрической прочности, выяснение природы пробивных токов (ионная или электронная лавина). Изучая пробой предварительно рентгенизированной каменной соли, а начало соответствующих исследований восходит к работам А. Ф. Иоффе в лаборатории В. Рентгена в Мюнхене, Кобеко и Курчатов доказали, что электрическая прочность зависит от подсветки, т. е. определяется, начиная с определенных значений плотностей электронного тока, электронными процессами в кристалле. В этих работах на одном и том же материале были исследованы как электронный, так и ионный

пробои, а также доказана выполнимость в определенных условиях закона Фарадея для обычных, не рентгенизированных кристаллов. Эта часть работы требовала особого «химического» мастерства, которое и проявил Павел Павлович.

Важное значение имели исследования Кобеко, Курчатова и Синельникова по униполярной проводимости кристаллов, обладающих смешанной (ионной и электронной) проводимостью. Объектами исследований были сернистые соединения меди CuS и Cu_2S. При этом был изучен весьма экзотический и красивый вид проводимости, связанный с прорастанием сквозь образец продуктов электролиза кристаллов. Отложение металла на электроде приводит к появлению тонких проводящих нитей, по которым может протекать электронный ток. Эти нити, пронизывающие образец изолятора и напоминающие ветви деревьев или очертания «ветвистой» молнии, авторы назвали дендритами, а соответствующую проводимость — дендритной. Рост дендритов зависит не только от величины приложенного поля и материала изолятора, но и от типа электрода (острие или плоскость). Все детали соответствующего эффекта были выяснены в работах молодых физтеховцев, и с их помощью удалось объяснить эффект выпрямления даже в тех случаях, встречающихся на практике, когда оба электрода — плоские. Оказалось, что поверхность электродов, прежде всего алюминиевых, покрыта слоем окисла, а свободные от окисла небольшие ее участки играют роль острий.

Работы по изучению выпрямляющего эффекта сернистых соединений меди были по существу первыми у нас в стране исследованиями полупроводников, каковыми являются CuS и Cu_2S.

Следующая серия совместных с И. В. Курчатовым работ конца 20-х годов связана с изучением аномальных свойств сегнетовой соли. На начальной стадии всех этих исследований Курчатов и Кобеко работали совместно, и только на завершающих этапах Кобеко от них отошел. В работах были изучены особенности сегнетовой соли, связанные с аномальным значением ее диэлектрической проницаемости, температурной ее зависимостью, а также явления гистерезиса, и намечена первая феноменологическая теория, строившаяся по аналогии с теорией Кюри—Вейсса для ферромагнетиков. П. П. Кобеко и его сотрудником И. Ю. Нелидовым был исследован так называемый электрокалорический эффект в сегнетовой соли и зафиксирован скачок теплоемкости в точке Кюри — признак фазового перехода II рода.

В дальнейшем научные интересы П. П. Кобеко и И. В. Курчатова начали расходиться. Павел Павлович все более углублялся в изучение аморфного состояния вещества, тогда как Игорь Васильевич с конца 1932 г. все большее внимание стал уделять работам по физике ядра, а работы по сегнетоэлектричеству (термин, ему принадлежащий!) и полупроводникам начал быстро сворачивать.

К началу 1932 г. сотрудники, работавшие в ФТИ, были разделены на несколько больших групп, а в пределах группы — на

бригады. Начальником бригады «Строение вещества» был И. В. Курчатов; он же руководил и бригадой «Изучение сегнетоэлектриков». Бригаду «Аморфные тела» возглавлял Павел Павлович. К 1940 г. она была преобразована в лабораторию полимеров.

Аморфными телами П. П. Кобеко заинтересовался прежде всего из-за их физической специфики. Кристаллы и газы можно рассматривать как некие предельные состояния вещества: идеально правильные (решетка) и «идеально хаотичные». Аморфные тела (своеобразные жидкости) занимают промежуточное положение, и их свойства более трудно поддаются объяснению. Кроме того, и это не менее важно для Кобеко, всегда интересовавшегося техническими выходами физики, аморфные тела широко применялись в изоляционной технике. Павел Павлович поставил перед собой задачу связать электрические характеристики соответствующих материалов с их структурой. Его интересовали как проблемы пробоя (естественное продолжение тех работ, с которых он начал свою деятельность в ФТИ), так и механизм, ответственный за диэлектрические потери. Последний определяется вращением диполей — эффект, который он и И. В. Курчатов анализировали при попытках построения феноменологической теории сегнетоэлектриков. Ключ к пониманию развивающихся в аморфном теле явлений лежал в исследовании температурного хода соответствующих процессов. Здесь П. П. Кобеко явился достойным продолжателем работ Г. Таммана (профессора Дерптского университета; с 1927 г. Г. Тамман был почетным членом Академии наук СССР). Он успешно развил представления Таммана в учение об аморфном состоянии. Его небольшая монография на эту тему [2] вышла в серии публикаций, издание которых было приурочено к празднованию 15-летия со дня образования ФТИ. В следующем, 1934 г., вышла еще одна монография на близкую тему [3], адресованная не только физикам, но и химикам, не столько научным работникам, сколько инженерам и студентам.

К исследованиям аморфного состояния П. П. Кобеко привлек и своих первых учеников по ФТИ — прежде всего Е. В. Кувшинского и И. Ю. Нелидова. В процессе анализа плавления, вязкости, электропроводности аморфных тел была установлена их связь со структурными изменениями, происходящими в аморфных телах, с явлениями релаксации. Значение этих исследований подчеркивается в приведенной выше характеристике Павла Павловича. Они подвели его к изучению высокомолекулярных соединений.

Исследования по физике аморфных веществ составили предмет диссертации П. П. Кобеко — одной из первых докторских диссертаций, защищенных в ФТИ. Защита состоялась в январе 1935 г., а диссертация называлась «Аморфное состояние вещества». К сожалению, протокол заседания Ученого совета, на котором проходила защита, не сохранился, но в личном деле Павла Павловича имеется рукописный отзыв на нее, написанный одним из официальных оппонентов проф. В. К. Фредериксом, крупным физиком-экспериментатором, основоположником советских иссле-

дований по жидким кристаллам. В заключение своего отзыва он писал: «Несомненно, что вся работа П. П. Кобеко является весьма значительным вкладом в науку. Можно утверждать, что дело изучения и вопрос понимания природы аморфного состояния вблизи интервала размягчения работами П. П. Кобеко существенно продвинуты вперед, о чем свидетельствует также факт заинтересованности в этих работах не только в Физико-техническом институте, но и в ряде других институтов (ЛЭФИ, НИФИ * и другие). Диссертант вполне достоин степени доктора физико-математических наук» (л. 16/об.).

17 ноября 1935 г. ВАК утвердил П. П. Кобеко в звании доктора физико-математических наук, а 9 декабря того же года — в звании профессора.

Начатая по инициативе и под руководством А. Ф. Иоффе перестройка тематики ФТИ, в котором примерно до начала 1932 г. занимались в основном изучением механических и электрических свойств кристаллов, заключалась в постановке трех новых направлений исследований. Первое из них — физику полупроводников — возглавил А. Ф. Иоффе. Уместно напомнить, что у истоков этого направления находились работы П. П. Кобеко и И. В. Курчатова по сернисто-медным соединениям. Вторым направлением — физикой ядра — стал руководить И. В. Курчатов. Наконец, третье направление — физика высокомолекулярных соединений — развивалось в ФТИ П. П. Кобеко, А. П. Александровым и их сотрудниками и учениками. Если работы И. В. Курчатова по ядерной физике поначалу не имели прикладного характера, то исследования А. Ф. Иоффе, П. П. Кобеко и их сотрудников сразу нашли себе применение в промышленности (эта сторона деятельности Павла Павловича рельефно отражена в характеристике А. Ф. Иоффе). На исключительную их важность указывается в ряде документов из личного дела Павла Павловича, в частности в письме, направленном 4 июня 1938 г. дирекции ФТИ главным инженером опытного завода Научно-исследовательского института синтетического каучука им. С. В. Лебедева. В этом письме указывается, что «способ получения морозостойких резин из синтетического каучука, разработанный совместно работниками опытного завода и ЛФТИ (Кобеко, Александровым, Мареем, Талмудом), в настоящее время проходит стадию внедрения в резиновую промышленность». Как видно из дальнейшего текста письма, внедрение осуществлялось, в частности, на знаменитом Ярославском резиново-асбестовом комбинате (ЯРАК). «Предварительные расчеты планового отдела нашего завода, — пишет его главный инженер, — позволяют считать, что в результате внедрения предложенного метода в резиновую промышленность годовая экономия составит 3 000 000 золотых рублей» [4, с. 89, 90].

* Ленинградский электрофизический институт (директором этого отделившегося от ФТИ института был акад. А. А. Чернышев); Научно-исследовательский физический институт при ЛГУ.

П. П. Кобеко представлял собой пример ученого-физика, который, глубоко проникая в существо изучаемых явлений, стремится дать им теоретическое истолкование. Успеху этой стороны его деятельности способствовали как талант, так и исключительная эрудиция Павла Павловича. С другой стороны, он блестяще знал технику физического эксперимента: разрабатывал идеи соответствующих опытов, эскизы приборов и аппаратуры. В числе его трудов имеется статья с примечательным названием «Обработка стекла на горелке».* Павел Павлович всегда был тесно связан с заводами договорными работами и консультационной деятельностью. Еще в 1930 г. совместно с И. В. Курчатовым они спроектировали заводскую лабораторию для завода «Красный треугольник» и выявили причины большого заводского брака выпускавшегося там листового эбонита. Позднее П. П. Кобеко был тесно связан с опытным заводом НИИ синтетического каучука, заводом «Севкабель» и рядом отраслевых НИИ.

Экспериментальная выдумка Павла Петровича, его золотые руки, умение быстро и естественным образом, без специальных усилий входить в контакты с людьми и завоевывать их доверие — все это с особой силой проявилось в годы войны.

Кобеко остался в осажденном Ленинграде. Он фактически возглавлял и объединял всех ленинградских физиков: к небольшой группе физтеховцев (17 человек — в конце августа 1941 г.) позднее присоединились многие другие физики. В воспоминаниях о Павле Павловиче, написанных Н. М. Рейновым [1], выразительно рассказано о том, как много П. П. Кобеко — член Комиссии по реализации оборонных изобретений при Ленинградском горкоме ВКП(б) — сделал в годы войны для осажденного города и фронта [5—7]. Пригодился опыт, приобретенный им в Горецком сельскохозяйственном институте, когда он сумел наладить регенерацию дефицитных в те годы реактивов! Способ извлечения растительных масел из олифы (удаление из нее в первую очередь свинцовых солей), разработанный Кобеко, спас много жизней! Весной 1942 г. П. П. Кобеко возглавил работы по размагничиванию кораблей Балтийского флота. Особенно большую помощь в этом ему оказывала также оставшаяся в Ленинграде В. А. Иоффе. Позднее он придумал оригинальный метод обезвреживания «наземных» мин, многие тысячи которых фашисты оставили в земле Ленинградской области. На танк устанавливалось устройство, подающее на шланг сжатый воздух давлением порядка 10 атм. «Сканируя» минное поле, струя сжатого воздуха вызывала взрыв мин, не причинявший никаких повреждений танку.

Целой эпопеей было исследование ладожского льда, поз-

* В этой работе П. П. Кобеко и Е. В. Кувшинского, входящей в большую серию публикаций П. П. Кобеко и его сотрудников под общим названием «Изучение аморфного состояния», даны физические обоснования и объяснения известных приемов и процессов обработки стекла.

волившее установить безопасные правила движения по Дороге жизни, — безопасные в том плане, что интервал допустимых скоростей автомобильного транспорта (20 км/ч $< v <$ 40 км/ч) и расстояний между встречными его потоками не приводил к резонансной раскачке и ломке ледяного покрова. Об этой стороне деятельности П. П. Кобеко, А. Н. Арсеньевой-Гейль, Н. М. Рейнова и других его товарищей-сотрудников можно подробно прочесть в цикле статей [8—11], опубликованных уже после войны. Они содержат и чисто научное описание проблем, с которыми физики столкнулись при выполнении соответствующих работ, и описание оригинальных и простых приборов, позволивших быстро выполнить их программу.

В ФТИ было налажено производство разработанного в лаборатории П. П. Кобеко еще в довоенные годы диэлектрика — эскапона, который оказался совершенно незаменимым для обеспечения функционирования радиолокационных установок (разработанных, кстати говоря, тоже в ФТИ Ю. Б. Кобзаревым, П. А. Погорелко и Н. Я. Черенцовым). Эскапон — синтетический каучук Пономарева (Л. Т. Пономарев — сотрудник Кобеко, выполнивший под его руководством цикл исследований, приведших к получению нового материала) обладал исключительно малыми диэлектрическими потерями на высоких частотах, что делало его пригодным для использования в высокочастотных трактах радиолокационных станций. В годы войны за эту работу Павел Павлович Кобеко получил специальную благодарность по Красной Армии и войскам противовоздушной обороны.

Известна роль, которую сыграла передача в Москву, в Лабораторию № 2 И. В. Курчатова, сохраненных усилиями ленинградской группы физтеховцев приборов, материалов и деталей оборудования ядерных лабораторий и строившегося в довоенные годы циклотрона. Косвенная оценка этой роли может быть получена из приветствия, направленного коллективом Лаборатории № 2 ленинградским физикам:

Сотрудникам Ленинградского физико-технического института

Дорогие товарищи!

Коллектив лаборатории атомного ядра приносит вам, работникам Физико-технического института, по сей день работающим в Ленинграде, свою глубокую благодарность и признательность.

Только благодаря вашей самоотверженной работе в труднейших условиях блокады вам удалось, наряду с текущей работой, сохранить и сберечь институт и его оборудование. В частности, вам мы обязаны тем, что ценнейшее оборудование ядерной лаборатории, созданное и приобретенное годами упорной работы коллектива ядерных лабораторий, оказалось в сохранности и может в нужный момент быть использовано.

Не ограничиваясь этим, вы оказали нам сейчас огромную помощь при изготовлении и отправке оборудования, весьма необходимого для нашей работы.

Все эти факты выходят далеко за пределы общепринятых понятий товарищества.

Мы глубоко тронуты вашим отношением к нам и хотим верить, что наша совместная работа еще впереди и что мы сможем хотя бы в небольшой степени отплатить вам тем же.

Это письмо, фотокопия которого хранится в ЛО Архива АН СССР (ф. 968, оп. 1, ед. хр. 22, л. 1), подписали сотрудники лаборатории, бывшие физтеховцы: И. В. Курчатов, А. И. Алиханов, А. И. Алиханьян, П. Я. Глазунов, В. А. Давиденко, М. С. Козодаев, М. И. Корнфельд, Л. М. Неменов, С. Я. Никитин, Г. Н. Флеров, Г. Я. Щепкин.

После победоносного окончания Великой Отечественной войны П. П. Кобеко возобновил работу на физико-механическом факультете Политехнического института, некоторое время был его деканом и с 27 апреля 1947 г. стал заместителем директора вернувшегося из эвакуации ФТИ. Со своими обязанностями на посту помощника А. Ф. Иоффе Павел Павлович, по воспоминаниям старшего поколения нынешних физтеховцев, справлялся замечательно, не прекращая интенсивной научной работы. Отдел, возглавляемый им в ФТИ, рос, пополнялся новыми кадрами. Расширялась тематика его исследований, включавшая теперь и проблемы физической химии белков. Молекулярный семинар ФТИ, которым руководил П. П. Кобеко, был по существу общегородским семинаром, хорошо известным, впрочем, и за пределами Ленинграда. Отношения Павла Павловича с коллегами и подчиненными были наилучшими. В качестве иллюстрации этих отношений приведем текст адреса, который был ему вручен в день его 50-летия.

Дорогой Павел Павлович!

В день Вашего пятидесятилетия сотрудники Ленинградского физико-технического института сердечно Вас поздравляют и приносят Вам наилучшие пожелания.

Мы хотели бы отметить Ваш юбилей не обычным текстом принятых в этих случаях обращений с перечислением Ваших академических достижений, военных и гражданских заслуг (они и так всем хорошо известны), а найти слова, которые позволили бы нам отразить те чувства, которые связывают нас, работников института, с Вами.

Много лет работаете Вы в институте: старожилы не припомнят, когда Вы в первый раз появились в нашем здании в Сосновке. Нам кажется, что Вы были здесь всегда, с «самого начала». За это время много людей сменилось и в наших стенах выросло уже несколько поколений работников.

Но к какому бы поколению не принадлежал тот или иной сотрудник института — каждый чувствует крепкую связь с Вами. Для одних Вы старый соратник в упорной борьбе за развитие

науки, для других — Учитель, поставивший на ноги и выведший в жизнь не один десяток начинающих физиков, для третьих — заботливый «хозяин» большого лабораторного коллектива, неустанно пекущийся о всех его больших и малых делах, для всех — друг и товарищ, которого все в институте знают и любят.

Мы так привыкли в течение более двух десятков лет ежедневно видеть Вас, общаться с Вами, обращаться к Вам по всяким делам и вопросам, что иногда забываем, что такие взаимоотношения могут возникнуть только в большой и дружной семье в течение долгой совместной жизни.

В день Вашего пятидесятилетия и двадцатипятилетия Вашей работы в институте Вам есть о чем вспомнить, дорогой Павел Павлович. Много событий произошло за это время, многое изменилось в институте, много людей прошло перед Вами. Ход времени не мог не отразиться и на Вас: Вы накопили большой научный и жизненный опыт, понимание людей и их поступков, с честью прошли через огонь войны и блокады. И несмотря на это Вы в то же время сохранили многое из того драгоценного, чем богата только юность и что обычно безвозвратно утрачивается людьми Вашего возраста и положения: здравый смысл, свободу от всякого филистерства, простоту в общении с людьми, уменье воспринимать доступные нам радости жизни. Как Вам удалось это сохранить, — это Ваш секрет, но Вы этот секрет знаете и в этом лучший залог того, что еще много лет Вы будете жить и работать в полную силу и передавать «дух живой» Вашим сотрудникам, ученикам и всем Вашим друзьям.

Архив ФТИ, л. 94, 95.

Как относился к П. П. Кобеко Абрам Федорович Иоффе, переживший на несколько лет своего ученика, можно судить по фразе из книги «Встречи с физиками», где Иоффе пишет о Кобеко и Курчатове как о «своих незабвенных учениках» [12, с. 108]. Как и все физтеховцы, П. П. Кобеко глубоко переживал уход Иоффе с поста директора ФТИ (декабрь 1950 г.) и с тревогой следил за неблагополучным ходом взаимоотношений, которые складывались у Абрама Федоровича с новым директором ФТИ А. П. Комаром. Об обстановке в институте можно судить, просматривая протоколы заседаний Ученого совета ФТИ тех лет. Из них же видно, что и направление работ, выбранное П. П. Кобеко в руководимом им отделе — физика и физическая химия высокомолекулярных соединений, тщательнейшее изучение свойств каучука, не получало поддержки новой дирекции ФТИ, из состава которой П. П. Кобеко вышел по собственному желанию в апреле 1951 г. Вскоре после выделения из ФТИ самостоятельной Лаборатории полупроводников, заведование которой было поручено А. Ф. Иоффе (соответствующее постановление Президиума АН СССР от 31 марта 1952 г.), в октябре 1952 г. перешел в Институт высокомолекулярных соединений АН СССР и Павел Павлович Кобеко вместе со своими ведущими сотрудниками (С. Е. Брес-

лером, Е. В. Кувшинским, Г. П. Михайловым, М. М. Котоном и др.). В новом институте лабораториям отдела П. П. Кобеко был оказан наилучший прием, которому бывшие физтеховцы во многом были обязаны тогдашнему директору ИВС АН СССР чл.-корр. АН СССР С. Н. Ушакову. Павлу Павловичу была предоставлена полная возможность продолжать и расширять свои исследования; молодой Институт высокомолекулярных соединений получил великолепный физический отдел, который в значительной степени способствовал прогрессу развивавшихся в нем комплексных исследований полимеров.

К сожалению, к этому времени здоровье Павла Павловича было уже подорвано годами блокады, непрерывным напряженным трудом — без отдыха и срока. В 1953 г. он перенес тяжелый удар — неожиданную смерть горячо любимой жены и помощницы Софьи Владимировны Кобеко. Павел Павлович чувствовал близость и своего конца и незадолго до смерти составил прощальное письмо к своим сотрудникам.

Моим сотрудникам по научной работе.

Дорогие друзья и товарищи по работе!

Я оставляю вас с ясной уверенностью в том, что вы все находитесь в полном расцвете творческой силы и научной зрелости. Старая нянька вам больше не нужна. Она даже, может, в какой-то мере стесняла вашу самостоятельность. Не ссорьтесь и, как раньше, дружно решайте поставленные перед вами научные задачи. Не поминайте меня лихом, покойный был неплохой человек и всегда искренне любил вас. Пишу это на всякий случай в связи с участившимися сердечными припадками. Ave amici! Moriturus vos salutat.*

П. Кобеко

В начале 1983 г. в Ленинградском Доме ученых по инициативе Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР и Института высокомолекулярных соединений АН СССР, с которыми была связана практически вся научная жизнь Павла Павловича Кобеко, состоялся вечер памяти замечательного ученого. Сильнейшее впечатление на собравшихся произвели воспоминания о Кобеко его ближайших сотрудников — Е. В. Кувшинского и Н. И. Шишкина, товарищей по блокадному Ленинграду — А. Н. Арсеньевой-Гейль, М. В. Гликиной, В. А. Иоффе, Н. С. Ивановой, рассказавших о мужестве и благородстве П. П. Кобеко в годы войны. Короткое время спустя пять организаций (помимо двух названных, Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина, в котором П. П. Кобеко работал с 1930 г. и последние годы жизни возглавлял кафедру физики диэлектриков, ленинградские научно-производственные объединения «Пласт-

* Славьтесь, друзья! Покидающий жизнь приветствует вас! (Лат.).

полимер» и «Позитрон») провели семинар-чтения, посвященные памяти Павла Павловича. Чтения состоялись 18 мая 1983 г. в Доме ученых в Лесном, в котором когда-то часто бывал Кобеко и в котором в конце 40-х—начале 50-х годов проходили заседания молекулярного семинара ФТИ. На мемориальном семинаре выступили чл.-корр. АН СССР директор ИВС АН СССР М. М. Котон, Е. В. Кувшинский, Н. И. Шишкин, А. Н. Арсеньева-Гейль, М. С. Гликина, Г. О. Карапетян, Л. Т. Пономарев, А. С. Семенова. Были заслушаны записанные на магнитофонную ленту слова Валентины Абрамовны Иоффе, посвященные памяти П. П. Кобеко. Один из ближайших друзей Павла Павловича, президент Академии наук СССР А. П. Александров, не смогший приехать в этот день в Ленинград, прислал на имя М. М. Котона телеграмму следующего содержания: «Очень рад, что вы решили создать научные чтения памяти нашего выдающегося физтеховца, прекрасного человека и ученого Павла Павловича Кобеко. К сожалению, я сейчас не могу приехать. Идет конференция по сохранению мира, в которой я обязан участвовать. Я много лет близко дружил с Павлом Павловичем, много мы вместе и работали, например по морозостойким каучукам. Направление П. П. Кобеко и Е. В. Кувшинского — физика аморфного состояния — в большой степени определило и мою полимерную деятельность, за что я Павлу Павловичу очень признателен. Привет всем участникам чтений. Александров».

Работы П. П. Кобеко получили заслуженное прижизненное признание. Еще в 1943 г. он был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. Его труд был отмечен высокими правительственными наградами, в том числе и воинскими: наряду с орденами Ленина и Трудового Красного Знамени, он был награжден орденом Отечественной Войны 2-й степени, медалями «За оборону Ленинграда» и «За победу в Великой Отечественной войне». Медаль «За оборону Ленинграда» Кобеко получил в числе первых — вместе с Ольгой Берггольц и Всеволодом Вишневским. Благодарная память о нем живет в сердцах советских физиков. Его исследования по сегнетоэлектричеству, аморфному состоянию, полимерам прочно вошли в золотой фонд советской науки. Научный и гражданский подвиг Павла Павловича Кобеко, его высокие человеческие качества служат для новых поколений советских физиков примером, достойным подражания.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рейнов Н. М.* Воспоминания о Павле Павловиче Кобеко. — Химия и жизнь, 1974, № 8, с. 90—96; № 9, с. 58—69; № 10, с. 90—96.
2. *Кобеко П. П.* Аморфное состояние. Л.; М.: ГТТИ, 1933.
3. *Кобеко П. П.* Физико-химические свойства полимеров. Л.: Госхимтехиздат, 1934.
4. Научно-организационная деятельность академика А. Ф. Иоффе. Л.: Наука, 1980.
5. *Кольцов А. В.* Ученые Ленинграда в дни блокады: 1941—1943. М.; Л.: Наука, 1962.

6. *Соболев Г. Л.* Ученые Ленинграда в дни Великой Отечественной войны 1941—1945. М.; Л.: Наука, 1966.
7. *Левшин Б. В.* Советская наука в годы Великой Отечественной войны. М.: Наука, 1983.
8. *Иванов К. Е., Кобеко П. П., Шульман А. Р.* Деформация ледового покрова при движении грузов. — ЖТФ, 1946, **16**, вып. 3, с. 257—262.
9. *Кобеко П. П., Шишкин Н. И., Марей Ф. И., Иванова Н. С.* Пластическая деформация льда. — Там же, с. 263—272.
10. *Кобеко П. П., Марей Ф. И.* Смачиваемость и прочность склеивания. — Там же, с. 277—282.
11. *Рейнов Н. М.* Прогибограф. — ЖТФ, 1943, **13**, вып. 11, 12, с. 661—666.
12. *Иоффе А. Ф.* Встречи с физиками. Л.: Наука, 1983.

П. Н. Федосеев

А. Ф. ИОФФЕ *

Я попросил слово, чтобы выразить глубокое уважение обществоведов Абраму Федоровичу Иоффе не только как выдающемуся ученому-физику, но и как глубокому мыслителю-философу. На протяжении всей своей научной деятельности А. Ф. Иоффе проявлял глубокий интерес к философии, особенно к философским проблемам физики. Уже в начале XX в. в самый разгар революции, охватившей физическую науку, Абрам Федорович интенсивно обсуждал философские аспекты теории относительности, квантовой физики, теории излучения (как в переписке, так и в своих выступлениях на семинаре, которым руководил известный физик П. Эренфест). После Октябрьской революции А. Ф. Иоффе выступает на многочисленных конференциях в диспутах, раскрывая на примере совершавшихся в физике великих открытий эвристичность и плодотворность принципов материалистической диалектики. В частности, он отмечал, что в физике исчез последний оплот механического мировоззрения — эфир в связи с его принципиальной ненаблюдаемостью. Показателен такой факт: А. Ф. Иоффе организовал в руководимом им Физико-техническом институте кабинет методологии физики.

В статье «Переделка мира: Организация научной работы в Советском Союзе», опубликованной в 1931 г., А. Ф. Иоффе писал: «Громадное преимущество дает нам методология диалектического материализма, свободная от элементов идеализма и мистики, пронизывающих во многих местах западную науку.

Мы обычно познаем природу и все явления путем противоречий. Теория относительности, теория света, строение материи натыкались на противоречия, которые казались исключающими друг друга. Неверие в логическую силу человеческой мысли, в саму логику, замена ее темной интуицией, потусторонней мистикой, возрождение идеализма, махизма характерны даже для крупней-

* Выступление на выездном заседании Президиума АН СССР в Ленинграде. — Вопросы философии, 1980, № 12, с. 132—134.

ших ученых эпохи империализма. От этих разочарований и блужданий в бесплодной области мистики наша наука защищена твердой почвой воинствующего материализма. Противоречия не смущают нашу науку, но, воспринятые диалектически, ведут к синтезу, к тому пути, на котором наука всегда находит разрешение вопроса и который ведет к новым знаниям» (Фронт науки и техники, 1931, № 6, с. 29).

А. Ф. Иоффе особо подчеркивал, что новейшие релятивистские и квантовые представления могут быть правильно философски истолкованы только при признании таких идей философского материализма, как существование внешнего мира и его познаваемости.

С глубоким интересом и уважением Абрам Федорович относился к философским трудам Ленина, находя в них принципиальные указания и для своего времени. Широкий резонанс вызвало выступление Иоффе на сессии Коммунистической академии, посвященной 25-летию с момента выхода в свет гениального ленинского труда «Материализм и эмпириокритицизм».

В докладе на сессии Иоффе рассматривал развитие атомной физики в первой трети нашего века в свете ленинского анализа «новейшей революции в естествознании». Говоря об основных представлениях квантовой механики, он формулирует следующую глубоко диалектическую мысль: «Каждое из этих представлений есть большой и несомненно положительный шаг вперед, и каждое из них, мне кажется, если его правильно разобрать, — одно из новых подтверждений диалектического материализма. Они лишний раз показывают, насколько реальный, вне нас существующий мир сложнее, многостороннее, чем те схемы, которые мы создали на основе прошлого опыта, как этот мир раскрывается нам в своих проявлениях путем отдельных противоречивых аспектов, диалектически объединяемых по мере накопления опыта в активном практическом применении. В трудностях и противоречиях современной теории заложены новые обобщения, новый синтез».*

Остановившись на вопросе о принципе причинности в микромире, Иоффе решительно отверг индетерминизм. В какой мере введение вероятностной причинности «нарушает основное понятие причинности»? — спрашивает он и отвечает: «Мне кажется, что ни в какой степени. Это есть только его уточнение, его углубление, но не его отрицание». На основе этого подхода им была написана статья «Развитие атомистических представлений в физике XX века», которая была опубликована в философском журнале «Под знаменем марксизма» в 1934 г., № 4. В дальнейшем А. Ф. Иоффе неоднократно выступал в этом журнале со статьями на философские и общественно-политические темы («О положении на философском фронте советской физики», 1937, № 11, 12; «Физика и война», 1942, № 5, 6). Он страстно выступал в защиту фундаментальных

* Цит. по кн.: *Иоффе А. Ф.* О физике и физиках. Л.: Наука, 1977, с. 46, 47.

Абрам Федорович Иоффе (1880—1960).

теорий современной физики, принципиально и остро критикуя нигилистическое отношение к ней со стороны некоторых философов и физиков. Он говорил, что такое отношение к науке вызывается «психологической ленью» (Под знаменем марксизма, 1934, № 4, с. 57).

В статье «О положении на философском фронте советской физики», подвергая критике философские высказывания А. А. Максимова, А. К. Тимирязева, известного физика академика В. Ф. Миткевича, он, в частности, пишет: «С легкой руки тов. Максимова иные сейчас думают, что диалектический материализм (а не его неудачные представители) запрещает самую квантовую теорию и теорию относительности, в то время как он отвергает тот идеалистический и религиозный туман, который с этими теориями пытаются связать некоторые буржуазные идеалисты. Такая мысль — вредное заблуждение, и его надо рассеять как можно скорее!» (Под знаменем марксизма, 1937, № 11, 12, с. 140).

В послевоенные годы А. Ф. Иоффе неоднократно выступал на заседаниях философского семинара и Ученого совета Физико-технического института с докладами, в которых обсуждались философские проблемы. Вот одно из характерных для него высказываний, относящихся к 1949 г.: «Весь ход развития науки и в особенности за последние 50 лет ее бурного развития, начиная с открытия рентгеновских лучей, открытия электрона, радиоактивности и вплоть до открытий, связанных в настоящее время

с ядром, — все это с величайшей полнотой свидетельствует о силе и правильности диалектического материализма и опровергает всяческие идеалистические подходы».*

В 1949 г. была опубликована книга А. Ф. Иоффе «Основные представления современной физики». В ней большое внимание было уделено философским и методологическим вопросам теории относительности и атомной физики, особенно в последней главе «Методологические выводы». Развитие фундаментальных физических теорий рассматривается в книге на основе ленинской теории отражения, в частности диалектики объективной, абсолютной и относительной истины. В книге анализируются также проблемы неисчерпаемости материи вглубь, диалектика прерывного и непрерывного, единства и многообразия мира в современной физике. Автор решительно критикует идеалистические истолкования физики в духе агностицизма, индетерминизма и др.

С огорчением мы вспоминаем, что эта книга в свое время подверглась нападкам со стороны некоторых философов, причем в журнале «Успехи физических наук» (1951, **45**, вып. 1, с. 113—120) ими были высказаны в адрес автора совершенно необоснованные обвинения в отступлениях от материалистического мировоззрения. Три года спустя А. Ф. Иоффе опубликовал в том же журнале ответную статью, в которой подверг обстоятельному разбору ошибочные замечания критиков его книги и разъяснял занимаемые им позиции по ряду философских проблем физической науки (Успехи физических наук, 1954, **53**, вып. 4, с. 588—598).

Следует сказать, что выдающийся физик свое критическое отношение к «неудачным представителям» философии никогда не переносил на всех философов, а тем более на философскую науку. Недавно вышла в свет книга А. Ф. Иоффе «О физике и физиках» (Л., 1977), в которой содержатся глубокие философские высказывания по актуальным вопросам физики и интереснейшие воспоминания о выдающихся физиках XX в.

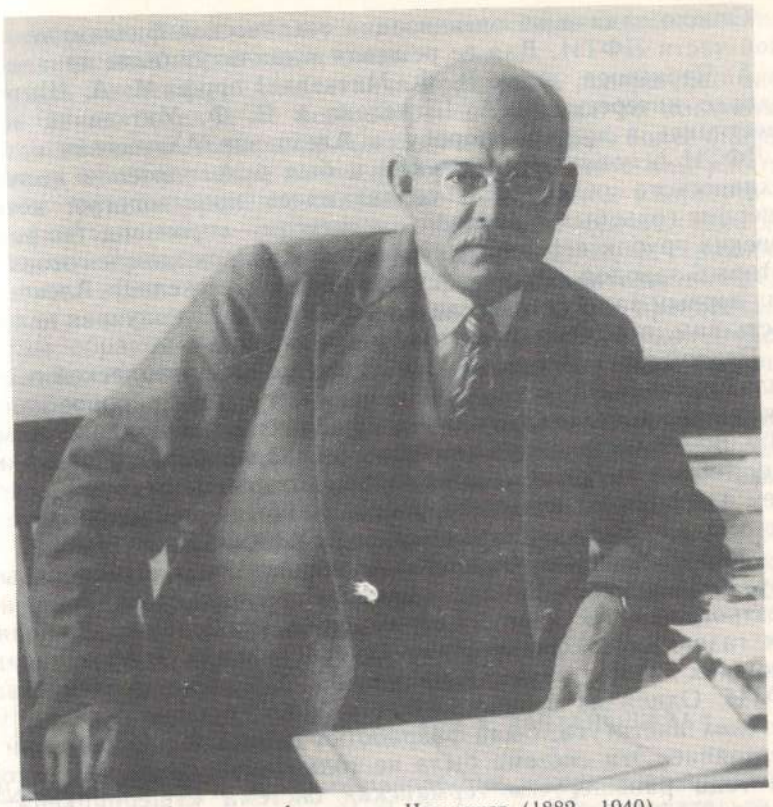
В свете своих блестящих трудов и всей совокупности своих воззрений А. Ф. Иоффе предстает перед нами как убежденный, последовательный диалектик-материалист, творчески применявший и развивавший философские идеи В. И. Ленина.

А. Ф. Иоффе

ПАМЯТИ А. А. ЧЕРНЫШЕВА **

Прежде чем приступить к нашей основной задаче,*** я хочу сделать внеочередное заявление. Вы знаете, что 18 апреля скончался Александр Алексеевич Чернышев — один из основателей Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ). Хотелось бы сказать несколько слов о нем, вспомнить о его участии в работе института.

* Архив ФТИ им. А. Ф. Иоффе, ф. 3, оп. 1, ед. хр. 185, л. 12.
** Выписка из заседания Ученого совета ЛФТИ от 23 апреля 1940 г.
*** На повестке дня была защита диссертации.



Александр Алексеевич Чернышев (1882—1940).

Александр Алексеевич был крупнейшим электротехником. Он ставил и разрешал важные технические задачи, вел организационную работу. Особенно существенно отметить его участие в работе ЛФТИ. С момента его основания в октябре 1918 г. Александр Алексеевич вошел в первый состав Совета ЛФТИ и с тех пор, в течение почти 20 лет, работал сначала здесь, а затем в Комбинате электрофизики, которым ведал.

Его роль была особенно велика в первые годы. В ЛФТИ имелась довольно значительная группа физиков, которая могла дать достаточный импульс для развития физики. К ним принадлежали: П. Л. Капица, Н. Н. Семенов, Я. И. Френкель и ряд других физиков, которые обеспечили успешное проведение физических исследований при институте. К названной группе принадлежала и Я. Р. Шмидт-Чернышева,* недавно скончавшаяся.

* Жена А. А. Чернышева.

Стояла задача об организации технической физики, технической части ЛФТИ. Для ее решения в институт были привлечены А. А. Чернышев, акад. В. Ф. Миткевич, проф. М. А. Шателен. Однако интересы М. А. Шателена и В. Ф. Миткевича вскоре сместились в другую сторону, а Александр Алексеевич остался в ЛФТИ основным работником и был руководителем всего его технического отдела. Он создал здесь производство, которое в первые годы было связано с институтом — производство рентгеновских трубок и радиотехнических установок, для изготовления которых заводов тогда не существовало. Александр Алексеевич был первым заместителем директора ЛФТИ. Его научная деятельность вам, вероятно, известна.

Первой его работой, выполненной еще на студенческой скамье, было создание соответствующих измерительных приборов для высоковольтной техники: вольтметра и ваттметра напряжением до 2000 В. Пользуясь сжатым газом, он разработал хорошо конструкторски оформленные приборы, которые послужили основанием для ряда других конструкций. Это были первые абсолютные вольтметр и ваттметр для высокого напряжения.

Затем Александр Алексеевич в первые годы после открытия Лауэ, еще в 1912—1913 гг., пытался получить гамма-лучи и их спектрограмму. В связи с этим он занимался и вопросами ионизации газов, чисто физическими исследованиями пробоя твердых и жидких диэлектриков. Повторяю, это было еще до организации ЛФТИ. Одной из первых крупных работ, проведенных им уже в стенах института, была разработка передачи изображений на расстояние. Эта система была не только выполнена на полтора-два года раньше, чем германская система «Telephunken», но по своим техническим показателям была не ниже, а значительно ее выше.

Постепенно, развернув исследования электротехнических проблем, проблемы газовых разрядов и ряда других технических вопросов, Александр Алексеевич возглавил большую область работ, разросшуюся в такой значительной степени, что вместе с группой своих сотрудников ему пришлось выделиться в самостоятельный Электрофизический институт. Эта сторона его деятельности многим известна, и не стоит об этом много говорить. Вы знаете, что Александр Алексеевич решал чрезвычайно разнообразные задачи в области автоматики, сигнализации, затрагивал в своих исследованиях целые области радиотехники, выпрямителей и особенно высоковольтной техники. В этом направлении он занимался лично и организовал научно-техническую работу в стране. В последнем номере «Вестника Академии наук» за этот год имеется большая статья Александра Алексеевича о проблемах энергетики и передачи электрической энергии постоянным током. В Академии наук СССР Александр Алексеевич руководил группой работ, которые были направлены на передачу энергии постоянным током и подготавливал все необходимое для технического обеспечения этого дела — высоковольтные выпрямители, преобразователи и все, что было связано с возможностями осуществления передачи энергии постоянным током.

Смерть Александра Алексеевича произошла совершенно внезапно. Он не болел и со всей энергией работал до последних часов своей жизни. Александр Алексеевич был всего более близок к нашему институту. Мне лично приходилось вести с ним работу в самые трудные времена, связанные с созданием института и постройкой здания, в котором мы находимся сейчас. Как вы знаете, оно приняло нас в свои стены в 1923 г., а строилось начиная с 1919 г., когда технические задачи строительства представляли исключительно большие трудности. Все это преодолевал главным образом Александр Алексеевич — так же, как и всю постановку технических производств, всю организацию технических работ.

Смерть вырвала Александра Алексеевича из наших рядов, когда он находился в полном расцвете сил. Еще только прошлым летом я вместе с ним отдыхал в Теберде, и никак нельзя было подумать, что жить ему осталось менее года.

Я вспомнил несколько фактов из научной, научно-технической и организационной деятельности Александра Алексеевича и хотел бы предложить почтить его память вставанием. (Все встают).

А. П. Гринберг

ОБ ОДНОМ ЗАБЫТОМ ИЗОБРЕТЕНИИ А. А. ЧЕРНЫШЕВА *

Во всех обзорах по истории разработки ускорителей заряженных частиц отдается должное У. Д. Кулиджу (Исследовательская лаборатория фирмы «Дженерал Электрик», г. Скенектади, США), который нашел способ ускорять электроны до энергии, во много раз большей, чем существовавший ранее предел примерно в 300 кэВ. Этот предел был связан с тем, что не удавалось построить вакуумную трубку, которая могла бы выдержать без пробоя приложение к ней напряжения свыше 300 кВ. Было известно, что в пробое трубки решающую роль играет «эффект холодного катода» — электронная эмиссия в результате большой напряженности электрического поля у поверхности катода. Кулидж изобрел каскадное соединение нескольких вакуумных трубок, на каждую из которых подавалось возможно большее напряжение, причем источники этого напряжения соединялись последовательно. Электроны проходили из одной трубки в другую через тонкое фольговое окно в металлическом электроде, общем для двух соседних трубок. Пройдя систему из n одинаковых трубок, электроны на выходе ее могли иметь максимальную энергию $\sim 300\,n$ кэВ. По существу Кулидж нашел, хотя и не сформулировал четко, тот принцип,

* Статья была написана к столетию со дня рождения академика А. А. Чернышева (1882—1940).

применение которого и в настоящее время является обязательным во всех высоковольтных трубках и питающих их устройствах, — принцип принудительного распределения потенциала вдоль трубки с целью получения возможно более равномерного распределения.

Оказывается, что описанную конструкцию трубки до Кулиджа предложил известный советский электротехник и электрофизик А. А. Чернышев — в то время профессор, заведующий отделом связи Ленинградской физико-технической лаборатории (ЛФТЛ) ВСНХ СССР [1]. Впервые на этот приоритет А. А. Чернышева указал М. Я. Лапиров-Скобло в статье [2], опубликованной в малораспространенном журнале, издававшемся в Москве в течение всего 2 лет. Вероятно, поэтому сведения, сообщенные Лапировым-Скобло, в дальнейшем нигде не цитировались. Статья была написана в связи с опубликованием работы Кулиджа «Применение очень высокого напряжения в вакуумных трубках» [3], которая представляет собой изложение речи, произнесенной 15 февраля 1928 г. Кулиджом при вручении ему медали им. Т. А. Эдисона. В этой статье сообщалось о последнем достижении Кулиджа * — сооружении трехкаскадной катодной трубки и ускорении в ней электронов до 900 кэВ.

М. Я. Лапиров-Скобло указывает, что А. А. Чернышевым «4 января 1926 г. было получено в Комитете по делам изобретений заявочное свидетельство № 6124 на особый тип сложной рентгеновской трубки и способ ее питания от цепи высоковольтного трансформатора» [2, с. 138]. Патент был выдан А. А. Чернышеву 30 ноября 1927 г. [5].

В статье [2] и в патентном документе [5] приводится описание рентгеновской трубки, изобретенной А. А. Чернышевым. Она составлена из «ряда отдельных трубок, расположенных последовательно, но отделенных друг от друга металлическими частями с отверстиями для пропуска электронного потока из одной трубки в другую. Каждая отдельная секция такой сложной трубки питается от отдельной секции высоковольтного трансформатора и потому в отношении изоляции ведет себя так же, как и обычная трубка» [2, с. 138]. В описании к патенту [5] приводится схематический чертеж каскадной рентгеновской трубки (рис. 1).

О физических принципах, положенных изобретателем в основу предлагаемой конструкции трубки, в патентном документе сказано мало: «Назначением металлических прокладок (промежуточных электродов трубки, — *А. Г.*) является экранирование отдельных частей трубки от влияния электрических полей, имеющихся в других частях ее» [2, с. 139]. В этих словах, по-видимому, выражен ход мыслей изобретателя, приведший его к идее каскадной трубки: для напряжения, которое можно приложить к двухэлектродной трубке, существует определенный предел, но ничто не мешает

* Тот же материал, но дополненный несколькими фотографиями каскадных трубок, приводится в другой статье Кулиджа [4].

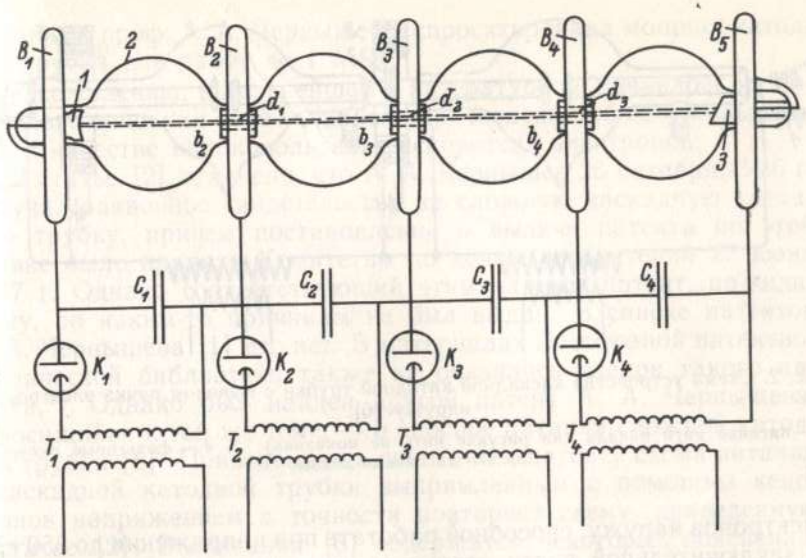


Рис. 1. Схема устройства каскадной рентгеновской трубки [5].
B — металлический диск; *d* — отверстие в нем; *T* — повышающий трансформатор. *1* — катод; *2* — стеклянная колба; *3* — антикатод.

составить ряд из таких не влияющих друг на друга трубок и пропустить пучок электронов через весь ряд. От этой идеи — только один шаг к пониманию того, что для повышения допустимой величины напряжения, приложенного к трубке, необходимо создать равномерное распределение потенциала вдоль трубки. Но в то время этот шаг еще не был сделан ни Чернышевым, ни Кулиджем.

А. А. Чернышев считал, что не будет препятствий к сколь угодно большому увеличению числа каскадов его сложной рентгеновской трубки. В описании к патенту сказано: «Увеличивая число секций трубки и число питающих трубку трансформаторов, можно получить лучи Рентгена любой жесткости» [5]. Кулидж по этому же поводу высказался более осторожно: можно надеяться, что использование принципа каскадной трубки «даст возможность построить трубку на любое напряжение, какое только удастся получить в генераторе высокого напряжения» [3, с. 212].

Обратимся теперь к вопросу о приоритете А. А. Чернышева. Статья Кулиджа [3], вызвавшая отклик Лапирова-Скобло, была не первой его работой, в которой излагалась идея каскадной ускорительной трубки. Кулидж впервые сообщил о ней в статье «Получение высоковольтных катодных лучей вне трубки, в которой они создаются», опубликованной в декабре 1926 г. [6]. В этой статье описана конструкция обычной запаянной катодной трубки (с двумя электродами) с фольговым окном для выпуска пучка

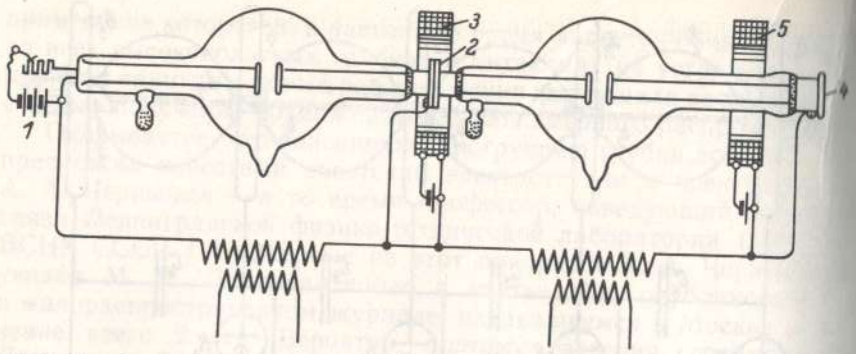


Рис. 2. Схема устройства каскадной катодной трубки с выводом пучка электронов наружу [6].

1 — питание нити накала (на рисунке нить не показана); *2, 4* — фольговые окошки; *3, 5* — магнитные линзы.

электронов наружу, способной работать при напряжении до 350 кВ. В заключительной части статьи рассматривается вопрос о возможности использования еще более высоких напряжений. Автор отметил, что имеется интересная возможность, которую необходимо исследовать, — включение трубок каскадно. На чертеже (рис. 2) изображена двухсекционная трубка, причем каждая секция снабжена фольговым окном, однако отмечено, что число секций может быть больше двух. Выражено намерение провести испытание каскадной системы, как только будет достигнута работа одной секции при максимальном напряжении.*

Сообщение об этой работе Кулидж сделал во Франклиновском институте 20 октября 1926 г. Таким образом, А. А. Чернышев предложил идею каскадной высоковольтной трубки почти на год раньше Кулиджа.

В статье М. Я. Лапирова-Скобло [2] содержится следующее замечание: «На чертеже изображена сложная катодная трубка и схема ее питания при помощи изготовленного фирмой «Koch und Sterzel» (по заказу А. А. Чернышева) высоковольтного оборудования» [2, с. 139]. Отсюда следует, что в ЛФТЛ по меньшей мере была предпринята попытка спроектировать и построить каскадную катодную трубку (на чертеже показана шестисекционная трубка, питаемая от трех повышающих трансформаторов, вторичные обмотки которых соединены последовательно, причем в каждой из них имеется вывод средней точки). Это заключение подтверждается следующими сведениями, приведенными в годовом отчете о научно-исследовательской деятельности ЛФТЛ за 1927/28 г.: «На основании данных, находящихся в патентах, выданных проф. А. А. Чернышеву, спроектирована мощная катодная трубка для работ до 1 МВ».*

К сожалению, в дальнейшем в литературе не появилось ни подробного описания этой установки, ни сведений об ее использовании в качестве высоковольтного ускорителя электронов.

В статье [2] отмечено, что А. А. Чернышев 26 октября 1926 г. получил заявочное свидетельство на сложную каскадную катодную трубку, причем постановление о выдаче патента по этой заявке было принято Комитетом по делам изобретений 27 июня 1927 г. Однако соответствующий этим данным патент, по-видимому, по каким-то причинам не был выдан. В списке патентов А. А. Чернышева [1] его нет. В материалах Всесоюзной патентно-технической библиотеки также не оказалось следов такого патента.** Однако был найден другой патент А. А. Чернышева, относящийся к той же теме, — о способе питания сложной катодной трубки [8]. Приведенная в описании к патенту схема питания 6-каскадной катодной трубки выпрямленным с помощью кенотронов напряжением в точности повторяет схему, приведенную в статье [2]. В описании [8] содержатся некоторые пояснения, касающиеся применения резистора в цепи питания каждого промежуточного электрода трубки.

Отметим в заключение, что единственное отличие каскадных трубок, независимо изобретенных Чернышевым и Кулиджем, состоит в том, что в трубке Чернышева отверстия в промежуточных электродах не затянуты фольгой. Как понятно сейчас, фольговые окошки не нужны для нормальной работы каскадной трубки. Более того, такие окошки играют неблагоприятную роль, рассеивая ускоряемые электроны, в результате чего за каждой фольгой расходимость пучка увеличивается. Кулидж намеревался бороться с этим недостатком с помощью магнитных линз, фокусирующих пучок (см. рис. 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Александр Алексеевич Чернышев: Материалы к биобиблиографии ученых СССР. М.: Наука, 1968.
2. *Лапиров-Скобло М. Я.* Сложные катодные трубки и применение очень высокого напряжения. — Вестн. теор. и эксперим. электротехн., 1928, № 4, с. 137—140.
3. *Coolidge W. D.* Use of very high-voltage in vacuum tubes. — J. Amer. Inst. Electr. Engrs, 1928, **47**, № 3, p. 212—213.
4. *Coolidge W. D.* Some past developments and future possibilities in very high voltage vacuum tubes. — Gen. Electric Rev., 1928, **31**, № 4, p. 184—185.
5. *Пат. 4051 (СССР).* Рентгеновская трубка / А. А. Чернышев. Заявл. 04.01.26, № 6124, опубл. 30.11.27.

* Кулидж построил двухкаскадную, а затем и трехкаскадную трубку на 900 кВ не позже 1927 г. Об этом можно судить по данным, содержащимся в речи Резерфорда, с которой он выступил 30 ноября 1927 г. [7].

* Архив ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР, ф. 2, оп. 1, ед. хран. 43, л. 53.

** Приношу благодарность заведующей справочно-библиографическим отделом ВПТБ М. В. Седых за любезную помощь в поиске патента.

6. *Coolidge W. D.* The production of high-voltage cathode rays outside of the generating tube. — J. Frankl. Inst., 1926, **202**, N 6, p. 693—721.
7. *Rutherford E.* Scientific aspects of intense magnetic fields and high voltages. — Nature (London), 1927, **120**, N 3031, p. 809—811.
8. *Пат. 9764 (СССР).* Способ питания сложной катодной трубки / А. А. Чернышев — Заявл. 02.06.28, № 28552, опубл. 31.05.29.

В. Я. Френкель

О ЗАСЕДАНИИ УЧЕНОГО СОВЕТА ФТИ, ПОСВЯЩЕННОМ ПАМЯТИ А. А. ЧЕРНЫШЕВА И Д. А. РОЖАНСКОГО

25 октября 1982 г. в Ленинграде состоялось объединенное заседание Ученого совета Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР (ФТИ) и методологического философского семинара института, посвященное двум памятным датам. 22 августа 1982 г. исполнилось 100 лет со дня рождения академика Александра Алексеевича Чернышева, а 1 сентября этого же года — 100 лет со дня рождения члена-корреспондента АН СССР Дмитрия Аполлинариевича Рожанского. ФТИ имел особое основание отметить юбилеи выдающихся советских физиков — их жизнь была тесно переплетена с институтом, в котором они не только работали в течение долгих лет, но и были ближайшими помощниками его основателя Абрама Федоровича Иоффе.

Заседание открыл директор ФТИ акад. В. М. Тучкевич, кратко изложив биографию Д. А. Рожанского. Дмитрий Аполлинариевич родился в Киеве. Высшее образование он получил в Петербургском университете, который окончил по физико-математическому факультету в 1904 г. В дореволюционные годы Рожанский принимал активное участие в социал-демократическом движении, был арестован царским правительством, находился под следствием. Семья Рожанских была прогрессивной и талантливой. Его брат, Николай Аполлинариевич, академик Академии медицинских наук, ученик И. П. Павлова, известный физиолог.

С 1904 по 1911 г. Дмитрий Аполлинариевич преподавал в Электротехническом институте, сотрудничал с А. С. Поповым.

Затем почти десять лет был профессором в Харьковском университете. В 1921—1923 гг. его пригласили в Нижний Новгород в радиолабораторию: он стоял у истоков советского радио.

С 1923 г. Дмитрий Аполлинариевич связывает свою судьбу с ФТИ и с физико-механическим факультетом Политехнического института, организованном в 1919 г. А. Ф. Иоффе. В Ученом совете ФТИ, в Ленинградской физико-технической лаборатории, игравшей роль связующего звена между ФТИ и промышленностью, он долгое время был первым заместителем Абрама Федоровича, с которым находился в тесной дружбе.

В 1933 г. Д. А. Рожанского избрали членом-корреспондентом АН СССР. Круг научных интересов Дмитрия Аполлинариевича

был очень широк и охватывал области физики твердых тел, физики газового разряда, радиофизики, распространения электромагнитных колебаний и радиотехники.

Скончался Дмитрий Аполлинариевич в Ленинграде, 27 сентября 1936 г.

После В. М. Тучкевича трибуна была предоставлена акад. Ю. Б. Кобзареву, одному из учеников Рожанского. Основное внимание в его выступлении было уделено исследованиям Рожанского по теоретической и прикладной радиотехнике. Знакомство Ю. Б. Кобзарева с Д. А. Рожанским произошло в 1925 г. в Харькове, когда Кобзарев учился в Институте народного образования — так назывался в те годы Харьковский университет. Тогда основной областью его интересов была термодинамика, а своеобразным хобби — радиотехника. Именно Дмитрий Аполлинариевич оказал решающее влияние на выбор его будущей специальности. Во время приезда в Харьков Рожанский должен был исследовать работу радиопередатчика Ленинградской радиостанции. Работа проходила ночами: привезенный Рожанским радиоприемник был настроен на волну Ленинградской радиостанции. В обязанности Кобзарева входило обеспечение питанием приемника. Вскоре Рожанский поручил Кобзареву осуществить радиосвязь с Ленинградом. В Ленинграде эту работу выполнял один из учеников Рожанского, в скором времени — его сотрудник по ФТИ, А. Н. Щукин (ныне академик).

В 1926 г. Ю. Б. Кобзарев переезжает в Ленинград и по рекомендации Д. А. Рожанского поступает в Ленинградскую физико-техническую лабораторию. С этого времени он в течение 8 лет работал в самом тесном контакте с Дмитрием Аполлинариевичем и имел возможность наблюдать его исключительные научные, научно-организаторские и чисто человеческие качества.

Как уже говорилось, интересы Д. А. Рожанского были чрезвычайно широки — это и вопросы, связанные с высоковольтной поляризацией диэлектриков, и теоретические и экспериментальные проблемы стабилизации ламповых кварцевых генераторов, и теория первых высокочастотных приборов — клистронов, и исследования явлений в ионосфере с целью изучения особенностей радиопередач на коротких волнах, и вопросы физики газового разряда. Для Дмитрия Аполлинариевича было характерно как глубокое владение экспериментальным искусством и техникой, так и умение теоретически осмыслить, «рассчитать» изучаемые явления. Это роднило Д. А. Рожанского с другими физиками его поколения — А. Ф. Иоффе, Д. С. Рождественским, Л. И. Мандельштамом.

Вместе с тем Дмитрий Аполлинариевич много времени и сил уделял консультациям, проводимым на ленинградских заводах — «Электросиле», «Светлане» и др.

Особую роль сыграл Д. А. Рожанский, возглавив первый этап работы по радиолокации. Этими работами он руководил сначала в Ленинградском электрофизическом институте, а затем и в ФТИ, где вокруг него собралась группа радиофизиков и

радиотехников. Был выбран путь импульсной (в отличие от непрерывной) локации, который уже после смерти Д. А. Рожанского привел к успешному решению проблемы обнаружения цели.*

Большое внимание в докладе Ю. Б. Кобзарева было уделено рассказу о личных качествах Д. А. Рожанского, его необыкновенной скромности, принципиальности, готовности прийти на помощь.

В докладе проф. Л. А. Сены говорилось в основном о деятельности Д. А. Рожанского в стенах Политехнического института, где им был прочитан целый ряд общих и специальных курсов. Докладчик отметил, что перу Дмитрия Аполлинариевича принадлежат главы в знаменитом курсе физики О. Д. Хвольсона, что он написал один из томов «Общего курса физики», выходившего под редакцией А. Ф. Иоффе. Педагогический талант Д. А. Рожанского ярко проявлялся в его умении вести студенческий семинарий. Предоставив студентам тему для обзорного доклада, Рожанский учил их не только уметь быстро освоить новую, подчас очень трудную область знаний, но и представить ее в виде, доступном пониманию, выявляя и подчеркивая главное в работе: ее идею или метод. Он с готовностью помогал студентам в процессе подготовки к докладу, при этом большую роль играло и совершенно свободное владение им многими европейскими языками.

«У меня — два дня рождения, — заключил свое выступление проф. Л. А. Сена. — Первый — это тот, который указан в паспорте, второй — это день, когда я познакомился с Дмитрием Аполлинариевичем и начал у него работать».

Последнее направление работ, увлекшее Д. А. Рожанского, было изучение физики газового разряда. Овладев проблемой, во многом продвинув ее вперед, Дмитрий Аполлинариевич подготовил курс физики газового разряда — уникальную по тому времени книгу, которую, к сожалению, ему уже не довелось увидеть опубликованной.

Доктор философских наук И. Д. Рожанский посвятил свой доклад рассказу о раннем периоде научной биографии своего отца, специально остановившись на харьковском периоде и, что представлялось особенно уместным в стенах ФТИ, на отношениях между Рожанским и Иоффе. Эти отношения характеризовались не только плодотворными научными контактами (исследования Рожанского в области изоляции и высоковольтной поляризации находились в русле многолетних научных интересов Иоффе), выработкой принципов преподавания физики на физико-механическом факультете Политехнического института, действенной помощью, которую в организационном плане Иоффе как директор ФТИ оказывал Рожанскому в развитии новых направлений исследований (радиолокации, физики газового разряда), но и чисто дружескими, семейными отношениями. Достаточно сказать, что первые несколько лет семья Дмитрия Аполлинариевича жила

* См. об этом в кн.: *Лобанов М. М.* Начало советской радиолокации. М.: Советское радио, 1975.

в нескольких комнатах квартиры Абрама Федоровича в Политехническом институте. Специальное внимание в докладе И. Д. Рожанского было отведено П. С. Эренфесту и тому влиянию, которое было оказано этим физиком-теоретиком, учеником Л. Больцмана и Ф. Клейна, на развитие физики в нашей стране, а также взаимодействию его с Д. А. Рожанским.

Второе отделение заседания было посвящено памяти акад. А. А. Чернышева. В краткой биографической справке об Александре Алексеевиче В. М. Тучкевич сообщил, что Чернышев родился неделей ранее Д. А. Рожанского, 21 августа 1882 г., тоже на Украине, в местечке Ловинь Черниговской губернии. Как и Дмитрий Аполлинариевич, высшее образование он получил в Петербурге, в 1907 г. закончив электромеханический факультет Петербургского политехнического института, и там же начал свою преподавательскую и исследовательскую деятельность. Основной областью его научных интересов в то время были вопросы высоковольтной техники.

Уже в 1918 г. А. А. Чернышев был привлечен А. Ф. Иоффе к работе в ФТИ, с которым он прочно связал всю свою жизнь. С 1918 г. и вплоть до 1931 г. он был заместителем директора ФТИ, а в 1931 г. встал во главе отпочковавшегося от ФТИ нового института — Ленинградского электрофизического (ЛЭФИ). Многое сделал А. А. Чернышев и для организации Ленинградской физико-технической лаборатории, которая, как упоминалось, существовала параллельно с ФТИ.

В 1929 г. А. А. Чернышев — член-корреспондент АН СССР, а в 1932 г. — ее действительный член. В 1930 г. за выдающиеся работы по электро- и радиофизике он был удостоен премии имени В. И. Ленина.

Александра Алексеевича недаром называли «советским Эдисоном». Ему принадлежит более 40 изобретений в разных областях техники (в телевидении, радиолампах, в усилительной и высоковольтной технике).

Скончался А. А. Чернышев 18 апреля 1940 г.

С рассказом о научной деятельности А. А. Чернышева, воспоминаниями о нем выступили Н. Д. Девятков, Л. С. Термен, Б. К. Шембель, А. П. Гринберг и А. Я. Рыфтин.

Акад. Н. Д. Девятков, работавший с А. А. Чернышевым в 30-х годах в организованном Александром Алексеевичем Ленинградском электрофизическом институте, подчеркнул широкий диапазон исследований, проводившихся в руководимой Чернышевым лаборатории. Это были вопросы радиотехники, электротехники, высоковольтных установок и линий передач, электронных приборов (в первую очередь высокочастотных: магнетронов и клистронов). Большую роль играли инициированные А. А. Чернышевым первые в СССР работы в области технической электроники. Под его руководством были разработаны серебряные и серебряно-цезиевые фотоэлементы, успешно использованные в системах автоматики и телемеханики, в первых телевизионных

устройствах. Исследования, за которые брался Чернышев, были всегда доведены до конца, до создания прибора или установки, до передачи их в производство. Придавая этим вопросам особенно большое значение, он организовывал при своих лабораториях первоклассные мастерские. А. А. Чернышев живо интересовался техническими проблемами — к примеру, разрабатывал установку для улавливания одного из вредных отходов производства — окиси цинка и т. д. Много внимания он уделял высоковольтной технике, линиям передач на 500 кВ и 1 млн В. Эти работы сохраняют свое значение и сейчас, когда строительство линий электропередач является важной составляющей общих работ по энергетике.

Н. Д. Девятков подчеркнул демократизм А. А. Чернышева, его заслуги в создании советской школы электрофизиков.

С воспоминаниями об А. А. Чернышеве выступил Л. С. Термен, который познакомился с А. А. Чернышевым еще в 1916 г. Это было время, когда Чернышев живо интересовался вопросами радиотехники, а Термен был в те годы начальником самой мощной (на 300 кВт) радиопередающей станции. А. А. Чернышев сыграл большую роль в жизни Л. С. Термена. Именно по его рекомендации в 1919 г. Лев Сергеевич был принят в число сотрудников ФТИ, работал в его отделе над вопросами электромузыки, радиосигнализации, телевидения.

Проф. Б. К. Шембель рассказал о работах, проводившихся в руководимом А. А. Чернышевым институте по проблемам радиолокации. Чернышев принял участие в одном из основных совещаний, оказавших решающее влияние на весь дальнейший ход работ по радиолокации. На совещании 16 января 1934 г., созванном А. Ф. Иоффе, помимо А. Ф. Иоффе и А. А. Чернышева, присутствовали Н. Н. Андреев, С. И. Вавилов, В. П. Линник, Н. Д. Папалекси, Д. А. Рожанский и др. В ЛЭФИ соответствующие исследования начали быстро развертываться под общим руководством Александра Алексеевича. Он привлек к ним большой коллектив своих сотрудников по ЛЭФИ, в том числе и Б. К. Шембеля. В качестве основного направления исследований был выбран принцип непрерывной посылки зондирующего радиосигнала на дециметровых волнах.

Доклад канд. физ.-мат. наук А. П. Гринберга был посвящен одному забытому изобретению А. А. Чернышева.*

Наконец, проф. Я. А. Рыфтин, сотрудник А. А. Чернышева по ЛЭФИ, рассказал об интенсивной изобретательской деятельности А. А. Чернышева, относившейся к вопросам видения на расстоянии. Около $^1/_3$ из 42 патентов, полученных А. А. Чернышевым, относятся к этой важной области радиотехники. Первый патент такого рода — «Устройство для видения на расстояние» (заявка от 26 января 1924 г., патент с приоритетом от 31 октября 1925 г.) представлял собой оригинальную комбинацию механических устройств, фотоэлементов и катодного осциллографа и предусматривал возможность приема и передачи движущихся изображений как по проводам, так и без проводов. Из сообщения Я. А. Рыфтина однозначно следовало, что А. А. Чернышев является пионером советского телевидения и что соответствующие работы в ЛЭФИ и других учреждениях Ленинграда, в которых над этими проблемами работали ученики и сотрудники А. А. Чернышева, уже в довоенные годы достигли высокого уровня.

В эти же дни в Ленинграде, в Белом зале Ленинградского Дома ученых состоялось еще одно заседание, посвященное памяти А. А. Чернышева и Д. А. Рожанского. С докладами выступили Л. А. Сена и В. Ю. Рогинский. Воспоминаниями об ученых поделились И. Д. Рожанский, М. А. Чернышева, А. В. Поссе и др.

* Доклад А. П. Гринберга публикуется в наст. сб. (см. с. 173).

А. Г. Остроумов, А. А. Рогачев

О. В. ЛОСЕВ — ПИОНЕР ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Никакая другая область современной науки и техники не оказывает столь сильного влияния на развитие производительных сил и соответственно производственных отношений, как полупроводниковая электроника. Полупроводниковая электроника произвела коренную революцию в технике связи и вычислительной технике. Впервые открылась реальная возможность полной автоматизации многих видов человеческой деятельности, которые еще совсем недавно относились к разряду умственного труда, требующего исполнителя высокой квалификации. Полупроводниковая электроника в такой же мере увеличила интеллектуальное могущество человека, как открытие пара и электричества увеличило его физическую силу. С появлением полупроводниковой электроники начался второй этап научно-технической революции. Отныне экономическая мощь государства, наряду с такими общепринятыми показателями, как энергетика, выплавка чугуна и стали, добыча угля и нефти и производство продуктов питания, определяется еще и владением полупроводниковой технологией.

Авторы настоящей статьи поставили себе целью проследить развитие полупроводниковой электроники на самых ранних этапах ее возникновения. Строго говоря, полупроводниковая электроника родилась практически одновременно с вакуумной электроникой, т. е. ориентировочно в период 1895—1905 гг. Однако единственным прибором в радиотехнических устройствах того времени, который с современных позиций можно считать полупроводниковым, был кристаллический детектор. Точная дата изобретения этого прибора не установлена. В 1906 г. Пиккард получил патент на кристаллический детектор, состоящий из кусочка кремния, находящегося в контакте с острой металлической проволочкой. Однако вполне возможно, что сущностью изобретения Пиккарда было именно применение кремния, а сама конструкция детектора с другими кри-

сталлами была известна ранее. Кристаллический детектор является примером изобретения, сделанного «вовремя». Он пришел на смену когереру, изобретенному Э. Бранли и усовершенствованному А. С. Поповым, и оказал весьма существенное влияние на развитие радиотехники. С небольшими изменениями он дожил до наших дней и является неотъемлемой частью почти каждого радиоприемника, особенно в области СВЧ-диапазона. Когерер, будучи очень ненадежным прибором, имел еще и другой недостаток. Он мог принимать только точки и тире, так как обладал только двумя состояниями: проводящим и непроводящим. В 1906 г. американец Ли де Форест изобрел вакуумный триод, который мог усиливать электромагнитные колебания и генерировать их в амплитудно-модулированной форме, что позволило приступить к радиовещанию.

Кристаллические детекторы в эпоху зарождения радиовещания способствовали его массовости. Детекторный приемник, т. е. приемник, не имеющий источников питания и обеспечивающий прием с помощью лишь энергии высокочастотных колебаний, поступающих из антенны, был чрезвычайно прост в изготовлении. Хотя кристаллический детектор и был по существу первым электронным полупроводниковым прибором, и поэтому он может рассматриваться в качестве предвестника полупроводниковой электроники, время зарождения полупроводниковой электроники все же следует отсчитывать от создания полупроводниковых приборов, могущих не только обнаруживать, но и усиливать и генерировать электромагнитные колебания. Человеком, сделавшим этот чрезвычайно важный шаг, был замечательный изобретатель и ученый Олег Владимирович Лосев. Ему принадлежат первые удачные попытки усиления и генерирования электромагнитных колебаний полупроводниковыми устройствами, обнаружение инжекционной и пробойной электролюминесценции в полупроводниках и первые систематические попытки исследования физической сущности этих явлений. Его замечательные открытия (усиление и генерация — 1921 г., электролюминесценция — 1924 г.) намного опередили свое время и оказались практически забытыми ко времени бурного развития полупроводниковой электроники, последовавшего после изобретения транзистора.

Литература о Лосеве немногочисленна. Имеется сборник его основных трудов, подготовленный Г. А. Остроумовым, который написал наиболее полную биографию и дал краткий очерк научной деятельности Лосева [Л. 1]. Этот очерк представляет особенную ценность, так как Г. А. Остроумов лично знал О. В. Лосева и долгие годы работал вместе с ним. Недавно нам удалось обнаружить в личном архиве его брата Б. А. Остроумова * неопубликованную

* Б. А. Остроумов был одним из ведущих сотрудников Нижегородской радиолаборатории и после переезда лаборатории в Ленинград (1928 г.) являлся руководителем Вакуумно-физической лаборатории ВЭСО, одним из сотрудников которой был О. В. Лосев.

Олег Владимирович Лосев (1903—1942).

рукопись книги «Олег Владимирович Лосев — изобретатель кристадина», написанную им совместно с И. А. Шляхтером. В этой рукописи содержится много сведений о жизни и работах О. В. Лосева, которые отсутствуют в других источниках. При написании этой статьи мы широко использовали их, особенно это касается нижегородского периода жизни О. В. Лосева. Авторы получили новые сведения и из бесед с А. Н. Арсеньевой-Гейль, Г. А. Остроумовым, В. П. Жузе и Л. А. Сеной, которые в разные периоды жизни О. В. Лосева знали его лично, и выражают им свою искреннюю благодарность.

Олег Владимирович Лосев родился 10 мая 1903 г. в Твери (ныне Калинин) в семье конторского служащего вагоноремонтного завода. Он был единственным и поздним ребенком в семье. Известно, что в первые школьные годы его любимым занятием были игры с электрическими звонками, деталями телефонных аппаратов и электромоторов. Его школьным учителем физики был Вадим Леонидович Лёвшин, впоследствии известный исследователь люминесценции в кристаллах, сотрудник лаборатории С. И. Вави-

лова. В 1917 г. Олег, будучи учеником 5 класса реального училища, присутствовал на публичной лекции «О сущности беспроволочного телеграфа», прочитанной В. М. Лещинским, начальником Тверской радиостанции русской армии. Любознательный мальчик был хорошо подготовлен для того, чтобы понять основной смысл лекции. Очень скоро он находит путь на Тверскую радиостанцию. Одновременно Олег усиленно занимается экспериментальной физикой под руководством своего школьного учителя В. Л. Лёвшина. Он много работает в физическом кабинете, помогая своему учителю в подготовке демонстрационных опытов. В то же время он начинает создавать небольшую домашнюю лабораторию. На самодельный приемник принимает сигналы (в то время только телеграфные) Московской радиостанции.

Прежде чем продолжить рассказ о дальнейшей судьбе О. В. Лосева, приведем некоторые сведения о Тверской радиостанции, коллектив которой в августе 1918 г. оказался основой замечательного учреждения — Нижегородской радиолаборатории. Работы этой лаборатории впоследствии стали гордостью нашей радиотехники.

Тверская радиостанция была одной из основных радиостанций русской армии (другие две были расположены в Царском Селе и Гомеле). Особенностью этой радиостанции было то, что в ее обязанности входил только прием сообщений других радиостанций и особенно сообщений стран Антанты — союзников России.

Главной задачей радиостанции был прием и усиление слабых электрических сигналов. Поскольку союзники не очень заботились о поставках в Россию современного радиотехнического оборудования, то на радиостанции весьма остро стоял вопрос об изготовлении его своими силами. Работы в этом направлении имели большое значение, так как основой техники, получаемой Россией от союзников, были искровые радиостанции с детекторами на основе когерера, т. е. практически те же станции, которые были изобретены Поповым и несколько позднее Маркони. Впоследствии когерер был заменен кристаллическим детектором. В армиях союзников в то время широкое распространение получили радиоприемники на электронных лампах. Наиболее совершенными были так называемые французские лампы, т. е. обычные теперь вакуумные триоды. Они успешно конкурировали с английскими, содержащими не вакуум, а разряженный газ, электрический разряд в котором несколько увеличивал эффективность прибора, но приводил к большим шумам и неустойчивой работе.

На Тверской радиостанции создалась небольшая группа патриотически настроенных офицеров, которые под руководством В. М. Лещинского и его ближайшего помощника М. А. Бонч-Бруевича пытались не только изготовлять, но и усовершенствовать приемную радиоаппаратуру. Так, в составе Тверской радиостанции возникла так называемая внештатная радиолаборатория. Внештатной она именовалась потому, что выполняла функции, выходившие за рамки простых задач радиостанции, а также из-за

скептического отношения командования к ее деятельности. Лаборатория, однако, имела определенные успехи. Наибольшим из них было то, что М. А. Бонч-Бруевичу удалось наладить производство вакуумных триодов, не уступающих по своим параметрам лучшим образцам, изготовляемым во Франции. После Великой Октябрьской социалистической революции, когда была установлена торговая блокада молодой Республики Советов, эти работы приобрели еще большее значение. В середине августа 1918 г. по указанию В. И. Ленина коллектив лаборатории переезжает в Нижний Новгород и становится ядром знаменитой радиолаборатории Наркомата почт и телеграфа.

Большую роль в деятельности лаборатории играл проф. В. К. Лебединский, который присоединился к деятельности лаборатории еще в тверской период ее деятельности в начале 1918 г. В. К. Лебединский был учителем В. М. Лещинского и М. А. Бонч-Бруевича в Николаевском инженерном училище. Его огромная эрудиция и научный авторитет обеспечили высокий уровень работы радиолаборатории и обстановку первоклассного научного учреждения, которая царила в лаборатории с первых лет ее существования. В. К. Лебединский был руководителем научного семинара — лабораторных бесед и председателем научно-технического совета лаборатории. Под его руководством лаборатория издавала журнал «Телеграфия и телефония без проводов» (ТиТбп). Наибольшую известность лаборатории принесли работы М. А. Бонч-Бруевича по теории и созданию мощных электронных ламп. Благодаря этим работам в конце 20-х годов наша страна занимала в этом вопросе ведущее положение в мире. В лаборатории несколько лет работал один из крупнейших физиков Д. А. Рожанский. Оригинальные электромашинные генераторы высокой частоты создавал инженер В. П. Вологдин — основоположник применения токов высокой частоты в промышленности.

Вернемся, однако, к биографии О. В. Лосева. В 1920 г. он окончил школу и решил поступить в Московский институт связи. Но учиться в вузе Олегу было не суждено. В сентябре 1920 г. в Москве происходил первый Российский радиотехнический съезд. О. В. Лосев бывал на его заседаниях, встречался со многими своими знакомыми по Тверской радиостанции. Его решение покинуть институт и ехать в Нижний Новгород не было поспешным. В Радиолаборатории он оказался в окружении блестящих специалистов по радиотехнике. Он мог продолжать изучать физику под руководством своего наставника В. К. Лебединского. К тому же можно ведь и совмещать учебу в Нижегородском университете с работой. В Нижегородской радиолаборатории (НРЛ) он был зачислен на должность рассыльного, а жил в здании лаборатории на лестнице у входа на чердак. Он получил задание изучить конструкции радиоприемников, особенно возможности использования неламповых усилителей. В то время, кроме ламповых, были известны только магнитные усилители. Первая научная публикация О. В. Лосева «О магнитных

усилителях» [1], посланная в печать в июне 1921 г., поражает ясностью изложения и зрелостью подхода. А ведь ее автору исполнилось только лишь 18 лет! И заключение, которое он выносит в результате своего исследования, удивляет своей трезвостью и практицизмом: магнитные усилители для радиоприемников практического значения не имеют. Одновременно с научной работой Лосев продолжает увлекаться демонстрационными опытами по физике для лекций В. К. Лебединского. Иногда эти опыты сопровождались коротким докладом самого Лосева. Один из таких докладов назывался «О быстроте разряда электроскопа». Фактически это было маленькое, но исчерпывающее научное исследование. Он показал, что если электроскоп помещен в закрытую стеклянную банку, то его листки не слипаются очень долго: воздух в банке практически полностью деионизирован за счет захвата ионов стенками банки. Однако любой источник ионов вызывает быстрый разряд, и он демонстрировал несколько таких источников: пламя свечи, расположенное на некотором расстоянии, электрический разряд. Всего сильнее действует радиоактивная соль урана. При приближении к электроскопу радиоактивного вещества листки электроскопа слипались практически мгновенно. Впоследствии Олег Лосев использовал опыты с электроскопом для доказательства отсутствия микроскопической дуги на поверхности контакта металл—окись цинка.

Другим предметом демонстрации Лосева была поющая вольтова дуга. Если дугу включить в *LC*-контур, настроенный на звуковую частоту, то, благодаря наличию у дуги отрицательного сопротивления, в контуре возникают колебания. Колебания силы тока меняют количество тепла, выделяемого дугой, и соответственно изменяют плотность воздуха в зоне дуги. Возникают достаточно мощные звуковые колебания. Становятся «слышимыми» различные воздействия на дугу: помещение ее в магнитное поле, продувание воздуха через электроды, изменение индуктивности и т. д.

Эти по существу учебные работы Олега Лосева показали ему, сколь разнообразен круг физических явлений, не нашедших еще применения в радиотехнике. Его научная работа развивалась в это время под руководством В. К. Лебединского, от которого он получил задание исследовать вольт-амперные характеристики кристаллических детекторов. Уже в первых опытах ему удавалось наблюдать участки отрицательного сопротивления. Возможно, что идея попытаться использовать это сопротивление для генерирования электрических колебаний родилась именно тогда.

В конце 1921 г. О. В. Лосев получил отпуск и уехал в Тверь. Он захватил с собой некоторые из исследованных им кристаллов с тем, чтобы продолжить опыты в своей домашней лаборатории. На скорую руку была собрана схема детекторного приемника, в котором на детектор из окиси цинка можно было подавать смещение от трех батареек для карманного фонаря. Почти сразу он получил неожиданно громкий прием сигналов Московской

радиостанции. Сравнение силы принимаемого новым приемником сигнала с имевшимся у него одноламповым регенеративным приемником показало, что новый приемник дает, по крайней мере, не меньшую громкость приема. А ведь он потреблял всего 1 мА тока от двенадцативольтовой батареи! В Нижнем Новгороде опыт был повторен и продемонстрирован В. К. Лебединскому и другим сотрудникам лаборатории. Сравнивались три приемника: обычный детекторный, приемник Лосева и один из лучших одноламповых регенеративных приемников. Сравнения показали, что новый приемник О. В. Лосева работает значительно лучше обычного детекторного и лишь немногим уступает ламповому. Опыты были многократно повторены, и на их основании было установлено, что свойством усиливать электрические колебания действительно обладает только детектор из окиси цинка. 9 марта 1922 г. доклад Лосева был заслушан на лабораторной беседе. Приведем протокол этой беседы.

«Протокол 36-й научно-технической беседы
9 марта 1922 года

Председатель: проф. В. К. Лебединский
Секретарь: С. М. Горленко
Присутствуют: 92 человека
Заседание открывается в 19 час. 50 мин.

Инженер А. Ф. Шорин докладывает о работе с быстродействующими и буквопечатающими аппаратами. . .

О. В. Лосев докладывает на тему: „Детектор-генератор". Докладчик описывает явление генерации незатухающих колебаний посредством обыкновенного детектора. С некоторыми детекторами можно получить колебания уже при нескольких вольтах. С таким детектором высокой частоты можно принимать незатухающие станции по методу биений, а также можно построить детекторные усилители.

Характеристика генерирующих точек кристалла „падающая", т. е. с отрицательным наклоном.

Всякий диод (в частности, детектор) может быть усилителем на той только части своей характеристики, где наклон ее отрицательный. Этим диод в корне отличается от триода, каковым является катодное реле.

Демонстрируется детекторный генератор.

Инженер Бялович спрашивает об устройстве детектора-генератора.

Докладчик отвечает, что найти генерирующую точку очень трудно, гораздо труднее обычного пользования детектором, но, когда эта точка найдена, то постоянство гораздо большее, доходящее по времени до нескольких часов.

Проф. Лебединский указывает на то, что эти обе работы являются ценным вкладом в науку и технику.

А. Ф. Шорин уже несколько лет работает с быстродействую-

щими буквопечатающими аппаратами изолировано от заграницы и добился примерно того же.

Работа О. В. Лосева ценна особенно для России, так как его детектор-генератор может заменить на небольших станциях катодные реле и найти повсеместное распространение в России.

В 22 час. 40 мин заседание закрыто».*

В чем же состоит сущность открытия О. В. Лосева?

Вот что он пишет в своей первой публикации, посвященной обнаруженному им явлению: «Генерирующий детектор — это не новость, но раньше, должно быть, колебания удавалось получить с высоким вольтажем или даже с дугой между минералами» [2, с. 374]. Лосеву были известны опыты англичанина Иклза [Л. 2], о которых писал А. Васильев в своем обзоре [Л. 3]. В этих опытах удалось возбудить колебания в электрическом контуре, прикладывая к галенитовому детектору напряжение до 400 В при значительном токе. Дальнейшего развития эти опыты не получили. О. В. Лосеву удалось установить, что один из известных в то время кристаллических детекторов, полученных на основе контакта металл—цинкит (ZnO), дает устойчивые колебания при приложении к нему напряжения менее 10 В. Попытки получить генерацию при столь низком напряжении во всех других случаях не привели к положительным результатам. Электрические характеристики контакта оказались столь стабильными, что, изменяя напряжение на контакте и устанавливая его в области напряжений, чуть меньше напряжения возникновения генерации, О. В. Лосеву удалось получить значительное усиление электрических колебаний, не сопровождающееся сколько-нибудь значительными шумами.

Далее в первой статье о детекторе-генераторе он пишет: «Точка кристалла, на которой получались колебания, совершенно другая, чем та, на которой происходило наилучшее детектирование без приложенного из вне напряжения» [2, с. 375].

Исследовав не одну дюжину контактов (цинкит, галенит, PbS, пирит FeS, халькопирит $CuFeS_2$, карборунд SiC, молибденовый блеск MoS, оловянный камень SnS_2 с угольными, медными, алюминиевыми, цинковыми, стальными, серебряными проволочками), он приходит к выводу [2], что наиболее легко получить генерацию на контакте цинкит—уголь.

Обсуждая позже результаты опытов, Лосев и Бонч-Бруевич пришли к заключению о возможности сопоставления возникновения колебаний в кристалле не только с электрической дугой, но и с двухэлектродной лампой. При определенных условиях последняя также имеет отрицательное сопротивление и способна генерировать колебания. Это свойство вакуумного диода не нашло широкого применения ввиду больших преимуществ трехэлектродной лампы. В детекторе третьего электрода нет, да и трудно было тогда ожидать, что его можно осуществить.

* Личный архив А. Г. Остроумова.

О. В. Лосев установил [2], что:

1) усиление или генерацию при помощи двухполюсника (детектора, лампы, вольтовой дуги и т. п.) возможно получить только в том случае, если он при определенных условиях обладает «падающей» вольт-амперной характеристикой — «отрицательным» сопротивлением (рис. 1);

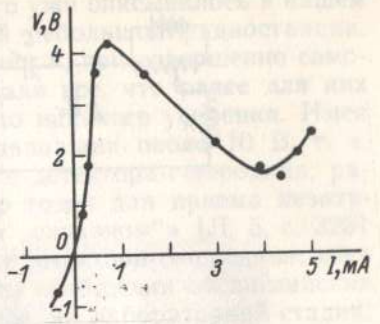


Рис. 1. Типичная вольт-амперная характеристика цинкитного детектора в «генерирующей» точке [2].

2) некоторые детекторы имеют падающий участок характеристики в определенном интервале токов и напряжений;

3) режим усиления или генерации определяется выбором тока и напряжения внутри этого интервала: при одних параметрах детектор работает как генератор, при других — как усилитель;

4) лучше генерируют кристаллы с меньшим удельным сопротивлением;

5) существенной оказывается обработка поверхности кристаллов — шероховатые («ребристые») кристаллы дают лучший эффект;

6) при последовательном включении детектора с отрицательным сопротивлением и нагрузки он служит усилителем напряжения, при параллельном — усилителем тока.

Схема одного из приемников О. В. Лосева показана на рис. 2, *а*, а его общий вид на рис. 2, *б*. Особенностью этого приемника является наличие двух кристаллов: детектора с отрицательным сопротивлением и обычного детектора. Если на кристалл с отрицательным сопротивлением подано смещение, достаточное для того, чтобы в контуре началась генерация, то приемник позволяет принимать сигналы телеграфных станций, «окрашивая» их тоном разностной частоты гетеродина и принимаемой станции. Сила сигнала при этом будет тем больше, чем больше амплитуда колебаний в контуре гетеродина. При приеме телеграфных станций приемник работает в регенеративном режиме. Величина отрицательного сопротивления выбирается такой, чтобы практически полностью компенсировать потери в обоих контурах приемника, но недостаточной для возникновения собственных колебаний. При этом возрастает не только чувствительность, но и избирательность приемника. О. В. Лосеву удалось получить 15-кратное увеличение сигнала в наушниках (головных телефонах) по сравнению с обычным приемником. Таким образом, приемник О. В. Лосева обладал всеми свойствами однолампового регенеративного приемника, но расход тока в нем был значительно меньше. Типичный для этого времени одноламповый приемник требовал

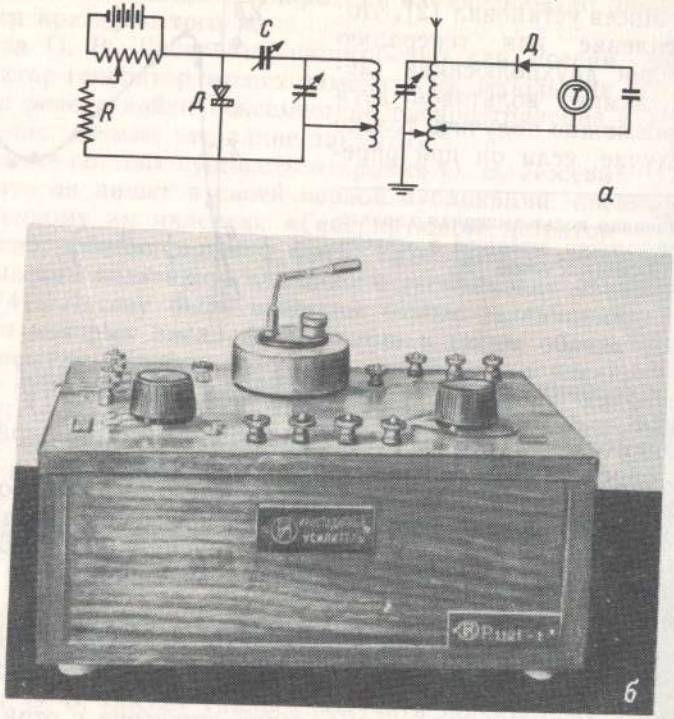


Рис. 2. Один из детекторных приемников О. В. Лосева [2].
а — схема приемника; *б* — общий вид.

для накала лампы 4 В и 0.2 А, а для питания анодной цепи требовалась батарея 60—120 В. Лосевский же приемник работал от трех батареек карманного фонаря, а расход тока составлял 1—2 мА. По этой причине открытие Лосева особенно понравилось радиолюбителям, которые писали в НРЛ, что при помощи цинкитного детектора, например в Томске, можно слышать Москву, Нижний, а также заграничные станции Науэн, Лион, Ганновер.

В начале 20-х годов в НРЛ существовала хорошая традиция, по которой председатель научного совета лаборатории проф. В. К. Лебединский каждый год публиковал в редактируемом им журнале «Телеграфия и телефония без проводов» (ТиТбп) краткие сообщения о деятельности лаборатории. Благодаря этому, теперь, в частности, можно узнать, как открытие О. В. Лосева было встречено специалистами. В 1922 г. В. К. Лебединский писал, что «простота изготовления такого детектора и незначительный вольтаж, требующийся в цепи, заставляют обратить серьезное внимание на явление, изучаемое О. В. Лосевым, особенно важное в условиях современной техники» [Л, 4, с. 350]. В статье В. К. Лебединского, опубликованной в июле 1923 г., читаем:

«Такой гетеродин, устройство которого уже описывалось в нашем журнале, побывал наконец на одной небольшой радиостанции. Радиотелеграфисты ее взялись за прием и, при совершенно самостоятельном пользовании им, услышали все, что ранее для них было недоступно, хотя и не требовало никакого усиления. Имея всего лишь семь сухих элементов, дававших около 10 В, т. е. меньше чем нормально требуется для детектора-гетеродина, радисты пришли к выводу, что прибор годен для приема незатухающих колебаний каждым рядовым „слухачом“» [Л. 5, с. 326] и далее: «Заграница, видимо, не знает детектора-гетеродина, хотя изобретение О. В. Лосева возникло из сообщения об английских опытах,* остановившихся, как кажется, на лабораторной стадии. Если бы это было не так, мы бы, конечно, видели в иностранных изданиях приемные схемы бесчисленных радиолюбителей Америки и Франции совсем иными» [Л. 5, с. 326].

Но вот заграница начинает знакомиться с открытием О. В. Лосева. В декабре 1923 г. в журнале ТиТбп сообщалось о визите в НРЛ немецких радиотехников А. Арко и А. Мейснера и о том, что детекторный генератор произвел на Арко впечатление такой новизны, соединенной с простотой, что он искал объяснения возможности появления такого прибора только в молодости талантливого изобретателя [Л. 6]. В 1924 г. В. К. Лебединский пишет: «Изобретенный в 1922 году О. В. Лосевым детектор-гетеродин... до сих пор не был известен за границей, но давно можно было предположить о его значении, прежде всего для радиолюбителей. В мае месяце этого года произошел как бы прорыв плотины: о лосевском гетеродине заговорили почти сразу в нескольких журналах. Прежде всего появилась статья в „Radio-Revue“, ее данные были воспроизведены в „Paris-Radio“ (17 июня); прибор признается сенсационным; ему дается название кристадин» ** [Л. 7, с. 329]. Далее В. К. Лебединский сообщает о статьях в журналах «Radio-Electricite» и «Wireless World».

Испанский журнал «Radio Sport» в августе 1924 г. знакомит читателей с открытием русского инженера Лосева. Отмечалось, что некий сеньор Ланфуз с помощью кристадина принял различные радиостанции и, между прочим, великолепно принял сигналы времени из Парижа. В журнале «Radio News» за сентябрь 1924 г. редактор Хуго Гернсбек выступает со статьей «Сенсационное изобретение». Он пророчески назвал «кристадин изобретением, делающим эпоху». «Потребуется несколько лет для того, чтобы генерирующий кристалл настолько усовершенствовался, чтобы стал лучше пустотной трубки, но мы предсказываем, что такое время наступит» [Л. 7, с. 433].

---

* По-видимому, имеется в виду статья Иклза [Л. 2], известная О. В. Лосеву, см. также [Л. 8, с. 199].

** Судя по статье «Кристадин за границей» (ТиТбп, 1924, № 26, с. 432), название «кристадин», по-видимому, впервые дано прибору О. В. Лосева редактором журнала «Radio-Revue» инженером Пине (Radio-Revue, 1924, 25, p. 39), но патент на название был выдан журналу «Radio News».

Журнал «Radio News» приводит рекламный проспект «кристадина», изготовляемого фирмой «Rasco». В проспекте дается объяснение относительно высокой цены кристадина (детектор целиком — 1.75 доллара и смонтированный и испытанный на генерацию кристалл цинкита — 60 центов). Дело в том, пишет журнал, что натуральный цинкит является единственным веществом, дающим в контакте со стальной проволочкой устойчивые колебания в схеме кристадина. Натуральный цинкит является одним из наиболее дорогих минералов, и источники его поставок в значительной мере истощены. На открытом рынке его цена составляет 25—30 долларов за фунт. Искусственный цинкит является продуктом более низкого качества и не дает возможность получить колебания. В НРЛ приходили сообщения и о том, что фирма «Телефункен» проводит серьезное исследование генерирующего детектора. Главный инженер фирмы «Маркони» Раунд уже значительно позже, в 1926 г., подробно исследовал кристадин Лосева. Его результаты, как и результаты, полученные фирмой «Телефункен», практически не внесли ничего нового. Природа явления оставалась загадкой.

Опытами с кристадином занимался и Р. Милликен, но и он не пошел дальше воспроизведения результатов Лосева. Советский физик был буквально засыпан письмами: радиолюбители писали ему о различных трудностях построения приемников с кристадином. По совету В. К. Лебединского он ответил всем сразу, издав брошюру «Кристадин» [15]. За короткий срок она переиздавалась трижды. С помощью заведующей библиотекой НРЛ О. А. Зайцевой О. В. Лосев переводит свою первую статью о генерирующем детекторе на немецкий и английский языки и направляет ее в журналы «Zeitschrift für Fernmeldetechnik und Gerätebau» и «Wireless World» [14, 19].

Здесь уместно заметить, что О. В. Лосев не патентовал изобретенного им устройства. Это недвусмысленно отражено в редакционной статье «Кристадин за границей». По-видимому, текст статьи был подготовлен редактором журнала В. К. Лебединским. В статье приведены высказывания заграничных журналов по этому вопросу. Журнал «Radio News» отмечал: «Молодой русский изобретатель О. В. Лосев передал свое изобретение миру, не взяв на него патента» [7, с. 433]. Французский журнал выражает это иначе: «Научная слава ожидает О. В. Лосева; что же касается до денежного благосостояния ... (многоточие в подлиннике, — *А. О., А. Р.*), то весьма вероятно, что оно ускользнет от него, как и от всех изобретателей, тем более, что он обнародовал свое открытие, думая прежде всего о своих друзьях, любителях всего мира» [Л. 7, с. 433].

В то же время у О. В. Лосева есть несколько патентов [3, 6, 9, 10], касающихся изготовления детектора и его применения в радиоприеме.

В 1923 г. начались регулярные передачи Московской радиостанции «Большой Коминтерн». С каждым годом улучшается

качество ее передач, растет мощность радиопередатчика. Со всей остротой встает вопрос о массовости изготовления радиоприемников. Радиосекция Связьплана Наркомата почт и телеграфа заслушивает сообщение О. В. Лосева. Заседание постановляет «признать, что детектор-гетеродин Лосева может иметь большое практическое значение для тех случаев, когда по местным условиям невозможно или затруднительно применение ламповых приемников, требующих аккумуляторных батарей (уездные и волостные приемные радиостанции), а также для военных целей при условии устойчивой работы в эксплуатации» [Л. 8, с. 237].

О. В. Лосев получает задание выпустить силами НРЛ небольшую партию кристадинных приемников.* Кроме того, он продолжает исследование схемных возможностей кристадина, возбуждает с его помощью колебания кварцевого резонатора. Однако основными энтузиастами изобретения О. В. Лосева остаются радиолюбители. С его участием радиолюбители Нижнего Новгорода проводят опыты по установлению радиотелефонной связи между двумя радиостанциями, в приемниках и передатчиках которых используется кристадин. Дальность связи достигает 2—3 км. В НРЛ приходит сообщение о том, что Калуга совершенно радиофицирована кристадинными радиоприемниками, там слушают радиостанцию им. Коминтерна и заграничные радиостанции.

Многие кружки радиолюбителей — энтузиастов кристадина были организованы в Ленинграде. Оценивая достоинства кристадина, ленинградские радиолюбители сообщали Лосеву, что с помощью лампы прием осуществляется несколько громче, но с ней много возни и поэтому она у них не в почете.

Как видно из приведенных отзывов, у современников не вызывало сомнений, что О. В. Лосев изобрел полезный прибор. Но видно и то, что без дальнейшего усовершенствования его применение ограничено. Кристадин обладал многими преимуществами по сравнению с вакуумными лампами, но он имел и недостатки. Самым существенным из них было то, что в отличие от вакуумных ламп, совершенствование которых опиралось на прочный фундамент физической теории, кристадин оставался все еще «вещью в себе». Без выяснения природы физических процессов, протекающих в кристадине, его дальнейшее совершенствование и развитие оказалось невозможным. Это понимает и О. В. Лосев. Отныне разрешение загадки чудесного кристалла становится целью всей его жизни. Прежде всего О. В. Лосев пытается усовершенствовать кристадин, действуя чисто эмпирически. Он устанавливает, что «переплавкой на вольтовой дуге (в присутствии перекиси марганца для предотвращения распыления кристалла при высокой температуре) можно из плохого цинкитного кристалла получить хороший, после подобной переплавки проводимость толщи возрастает в 4—7 раз; соответственно

* Один из этих приемников и сейчас находится в Центральном музее связи им. А. С. Попова в Ленинграде.

возрастает и способность генерировать колебания» [8, с. 352]. Лосев совершенствует технику нахождения генерирующих точек кристалла, проводит испытания, которые показали, что «колебания сохранялись с неизменным периодом и амплитудой в течение более трех суток, несмотря на то что детектор испытывал механические сотрясения. Колебания прекращались только при выключении детектора» [18, с. 411].

Ко времени изобретения кристадина практически отсутствовали какие-либо теоретические представления, объясняющие природу выпрямляющего действия промежутка металлическое острие—кристалл. Наличие области вольт-амперной характеристики, обладающей отрицательным сопротивлением, еще больше сужало набор известных в то время физических явлений, которые в принципе могли бы быть использованы для объяснения природы явлений, происходящих на границе металла с кристаллом. Статья О. В. Лосева [5] начинается следующим образом: «Как уже было отмечено проф. В. К. Лебединским в ТиТбп, № 15, стр. 579, действие детектора все больше склоняются объяснить электронными разрядами, происходящими вследствие большого градиента потенциала в точке контакта. В настоящей статье приведены соображения и результаты опытов, которые, на наш взгляд, подтверждают правильность подобного объяснения» [5, с. 45].

На первый взгляд, все кажется нормальным: единственными двухэлектродными устройствами, обладающими отрицательным сопротивлением и известными в то время, были вольтова дуга и искровой промежуток; точка зрения об аналогии между явлением, обнаруженным Лосевым, и этими приборами высказана маститым, всеми уважаемым профессором, его учителем. В этой ситуации вторая фраза статьи о том, что настоящая статья О. В. Лосева, которому еще не исполнилось и 20 лет, подтверждает соображения, высказанные В. К. Лебединским, кажется, на первый взгляд, вполне объяснимой. Однако анализ статьи показывает, что О. В. Лосев соглашается с точкой зрения своего учителя отнюдь не безоговорочно. Для него она лишь отправной момент, требующий экспериментального подтверждения. В попытках найти физическое объяснение наблюдениям О. В. Лосева участвовали многие сотрудники лаборатории. В частности, было высказано предположение, что первопричиной падающего участка вольт-амперной характеристики у Лосева является разогрев контакта и благодаря отрицательному температурному коэффициенту снижение его сопротивления [18 и Л. 9]. О. В. Лосев исследует действие температуры на характеристику детектора. Его данные отчасти подтверждают, а отчасти опровергают первоначальную точку зрения. При данном напряжении на детекторе незначительное нагревание увеличивает ток через детектор, крутой участок вольт-амперной характеристики наступает при меньших напряжениях. Этот факт Лосев объясняет тем, что «истечение» электронов с контакта происходит не только под действием сильного поля, но и температуры. Однако другая серия опытов

показывает, что контакт имеет температуру, близкую к комнатной. Более того, сильное нагревание контакта приводит к исчезновению участка с отрицательным сопротивлением и срыву колебаний, что отличает контакт металл—цинкит от вольтовой дуги, для работы которой контакты обязательно должны иметь повышенную температуру. Кроме того, Лосев не находит характерного свечения, сопровождающего работу электрической дуги.

Интересны выводы, к которым приходит О. В. Лосев в этой статье: «1. Действие как генерирующего, так и прочих детекторов объясняется электронными разрядами» и далее... «3. Разряды, которыми действуют генерирующие точки, не являются вольтовыми дугами в буквальном смысле, т. е. не имеют накаленных электродов» [5, с. 61].

Таким образом, представления об электрической дуге или искре не оставлены полностью. О. В. Лосев проводит опыты, в которых с помощью электроскопа доказывает, что работа кристадина не сопровождается заметной ионизацией воздуха. Однако главная особенность дуги — это свечение. В цинкитном детекторе такого свечения обнаружить не удалось. Но уже в одной из первых статей, посвященных генерирующему детектору, он отмечает, что в детекторе из карборунда, который, однако, не генерирует колебаний, при пропускании тока возникает зеленоватое свечение. В одной из последующих статей он пишет: «Недавно были сделаны микрофотоснимки этого свечения; они как будто указывают на микроскопический электронный разряд, получающийся параллельно контакту. Вероятнее всего, кристалл светится от электронной бомбардировки аналогично свечению различных минералов в круксовых трубках...» [18, с. 409].

Таким образом, свечение происходит внутри кристалла! Здесь мы видим, как под влиянием проведенных Лосевым экспериментов трансформируется первоначальная гипотеза о микроскопических вольтовых дугах.

Теперь, много десятилетий спустя, мы, пользуясь достижениями квантовой теории твердых тел, хорошо понимаем, что в 1924 г. ни Лосев, ни кто-либо другой не могли дать правильного объяснения наблюдаемым в цинкитном детекторе явлениям. Нужно было сначала построить зонную теорию твердых тел, на ее основе развить теорию выпрямления на границе металл—полупроводник и уж потом изучить возможные нестабильности тока в таких системах. Это были задачи, с которыми физика сумела справиться лишь к концу 50-х годов.

Положение О. В. Лосева представляется, таким образом, практически безнадежным. С одной стороны, он понимает важность своего открытия, с другой стороны, для выигрыша соревнования с непрерывно совершенствующимися электронными лампами кристадин тоже должен совершенствоваться, но как? Эмпирические способы его улучшения уже почти полностью исчерпаны: исследовано более дюжины минералов, более или менее пригодных для применения в кристаллических детекторах, про-

ведены опыты по переплавке цинкита. Результат этих усилий мало продвинул проблему — параметры кристадина оставались примерно на том же уровне, что и в первых опытах в Твери.

Необходимо было разобраться в сущности происходящих в кристадине процессов. Набор средств для экспериментального исследования, имевшихся в руках О. В. Лосева, был крайне ограничен и практически полностью исчерпан. Он помещает кристадин в магнитное поле и убеждается, что поле напряженностью 1 Т на него не влияет. Он делает вывод, что характерные размеры электронного разряда крайне малы. Исследование излучения открывало перед Лосевым большие перспективы. Кроме факта его существования, можно было использовать его интенсивность, спектры, локализацию в пространстве. Он сразу приступает к этим опытам, но их осуществление затягивается — НРЛ не располагает подходящими оптическими приборами.

Как мы уже говорили, обязанностью О. В. Лосева в НРЛ являлась разработка радиоприемников. Одной из проблем, с которой сталкивались тогда разработчики радиоприемников, были так называемые паразитные колебания. Как правило, они возникали при попытке усложнения схемы приемника и проявлялись в виде свистов и «капания» на частотах звукового диапазона. В отдельных случаях это было самовозбуждение на звуковой частоте из-за обратной связи через источник питания. Этот вид паразитных колебаний был хорошо понятен, и борьба с ним не вызывала особых затруднений. Но имелся и другой, более загадочный тип низкочастотных колебаний, который был так или иначе связан с наличием в цепи высокочастотного сигнала. Умножение частоты в нелинейных цепях было известно и широко применялось — работа радиотехнических устройств на кратних гармониках. Деление частоты в нелинейных цепях — работа на дробных гармониках в то время казалась невозможной. Сложность теоретического анализа этих нелинейных процессов была такова, что многим казалось, что какие-либо определенные закономерности здесь вообще отсутствуют.

О. В. Лосев решил провести эксперимент, который позволил бы получить паразитную генерацию в наиболее простых условиях с тем, чтобы выяснить сущность процесса чисто экспериментальным путем. В основе идеи опыта лежало наблюдение Лосева о том, что паразитная генерация наиболее легко возникала в тех случаях, когда в одной и той же цепи одновременно усиливались высокочастотный и низкочастотный сигналы. Особенно часто, отмечает О. В. Лосев в своей первой статье, посвященной этому вопросу [25], паразитная генерация возникает в регенеративно-рефлексивных * приемниках в местах перехода от высокой частоты к низкой.

* Рефлексивными, или рефлексными, назывались схемы, в которых одна лампа использовалась дважды, например для усиления высокой и низкой частот с последующей развязкой высокочастотного и низкочастотного сигналов с помощью электрических фильтров.

Первый опыт он ставит с помощью генерирующего цинкитного детектора (рис. 3). Изменяя напряжение на генерирующем кристалле с помощью потенциометра, можно было добиться того, что, наряду с генерацией в высокочастотном контуре, в низкочастотном контуре, образованном емкостью C и индуктивностью телефона, возникали колебания на резонансной частоте этого контура. Трансгенерация была получена и в ламповых схемах (рис. 4). Вот как описывает работу этой схемы О. В. Лосев: «При изменении связи между L_1 и L_2 анодный ток лампы генератора меняется согласно кривой рис. 5, *а* (генератор отрегулирован на повышение анодного тока при увеличении амплитуды его колебаний), выпрямленный ток в цепи выпрямителя — согласно кривой рис. 5, *б*. По оси абсцисс отложено расстояние между катушками связи L_1 и L_2. Связь уменьшается слева направо. На участках ab и a_1b_1 (соответствующих друг другу) и возникает трансгенерация» [25, с. 437]. Длина волны первичного генератора G в опытах автора была от 720 до 3220 м. Колебания трансгенерации можно было получить с частотой от одного в несколько секунд до 10 000 в 1 с в зависимости от электрических постоянных контура L_tC_t. Кроме того, «оказалось возможным от одного генератора получить одновременно две трансгенерации в двух различных выпрямительных контурах. . .» [25, с. 438]. Мы видим, что Лосев считает наблюдаемую им низкочастотную генерацию по существу новым явлением, которое он называет «трансгене-

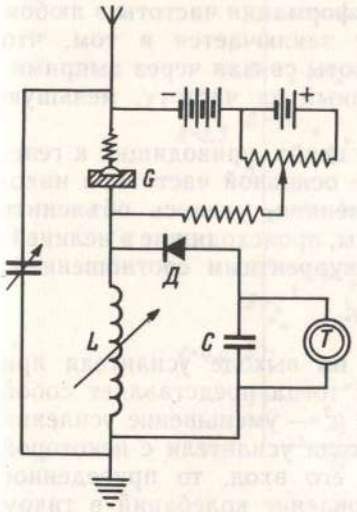


Рис. 3. Схема регенеративного кристадинного усилителя, примененная О. В. Лосевым в первых наблюдениях трансгенерации [25].

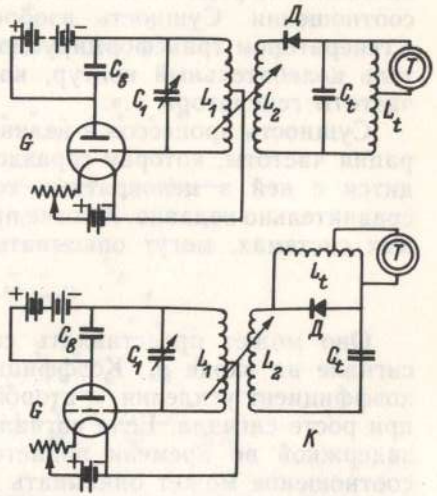


Рис. 4. Схемы ламповых усилителей О. В. Лосева для изучения трансгенерации [25].

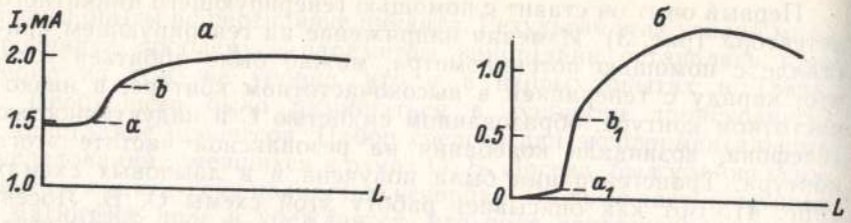


Рис. 5. Изменение анодного тока генератора (*а*) и выпрямленного тока в контуре (*б*) в зависимости от их взаимной индуктивной связи [25].

рацией». Трансгенерация возникает при увеличении глубины положительной обратной связи в контуре высокочастотного генератора (амплитуда высокочастотных колебаний при уменьшении связи с низкочастотным контуром возрастает). Далее О. В. Лосев обнаруживает, что частота трансгенерации не определяется настройкой низкочастотного контура, который лишь отфильтровывает нужную гармонику. Лосеву удается наблюдать трансгенерацию в *RC*- и *RL*-контурах. Период колебаний сильно зависит от глубины обратной связи в генераторе. При ничтожном изменении настройки происходит удвоение периода колебаний. Находясь в фактически произвольном отношении к частоте высокочастотного контура, частота трансгенерации тем не менее определялась этим контуром, т. е. происходила трансформация частоты в сторону *понижения*. О. В. Лосев получает авторское свидетельство [24] на способ трансформации частоты. В описании к заявке он пишет: «Предлагается способ трансформации частоты в любом соотношении. Сущность изобретения заключается в том, что с генератором трансформируемой частоты связан через выпрямитель колебательный контур, настроенный на частоту, меньшую частоты генератора. . .».

Сущность процессов в нелинейных цепях, приводящих к генерации частоты, которая гораздо ниже основной частоты и находится с ней в целократных соотношениях, удалось объяснить сравнительно недавно. Многие процессы, происходящие в нелинейных системах, могут описываться рекуррентным соотношением:

$$y_{n+1} = ky_n - y_n^2.$$

Оно может представлять сигнал на выходе усилителя при сигнале на входе y_n. Коэффициент k тогда представляет собой коэффициент усиления, а второй член y_n^2 — уменьшение усиления при росте сигнала. Если сигнал с выхода усилителя с некоторой задержкой во времени подается на его вход, то приведенное соотношение может описывать установление колебаний в таком генераторе и определять спектр частот генератора. Это соотношение описывает и многие другие процессы: рост популяций, образование вихрей и т. д. [Л. 10, 11]. При достаточно малых k y_n при увеличении n стремится к постоянному значению. Применительно к схеме рассматриваемого нами генератора это означает, что генерируются колебания установившейся амплитуды с частотой, равной обратному времени задержки сигнала между входом и выходом усилителя (рис. 6, *а*). При достижении k критического значения $k = 3.0$ характер колебаний меняется. Появляется составляющая с удвоенным периодом (рис. 6, *б*), т. е. система выходит на повторяющееся значение y_n в два раза реже. Причину удвоения периода легко понять: если y_n велико, то следующее y_{n+1} будет *меньше*, чем y_n. В свою очередь маленькое y_{n+1} в следующем периоде даст *большее* y_{n+2} и т. д. При дальнейшем увеличении k происходит новое удвоение периода (рис. 6, *в*). При приближении k к критическому значению, равному 4, коле-

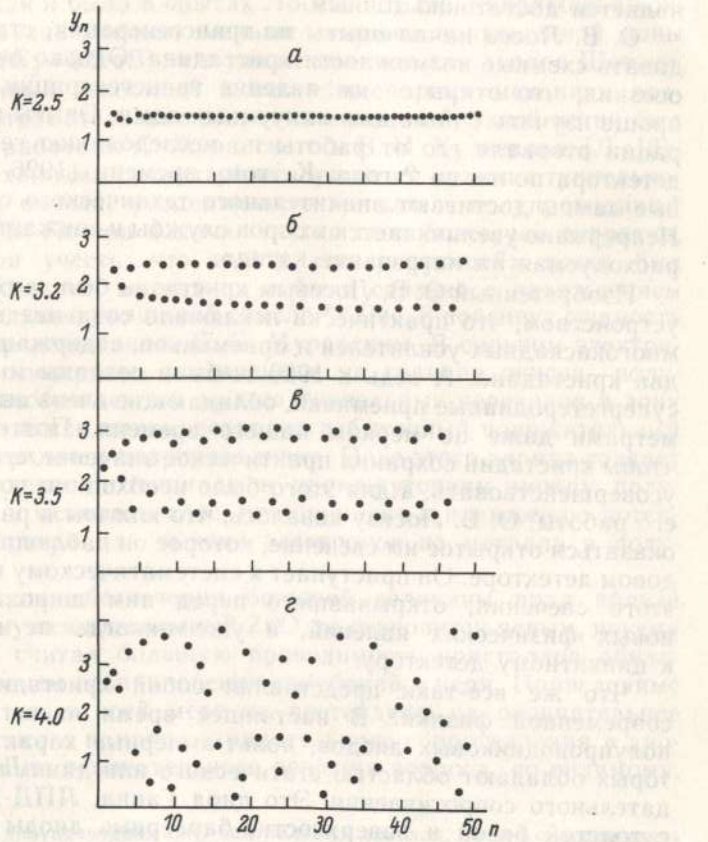


Рис. 6. Поведение нелинейной системы при различных значениях k, рассчитанных на ЭВМ.

а — система стабилизируется; *б* — появляются колебания с удвоенным периодом; *в* — появляются колебания с учетверенным периодом; *г* — период колебаний стремится к ∞ — поведение системы становится хаотичным.

14 Заказ 1006

бания начинают носить все более сложный характер, однако существует увеличивающийся с ростом k период. В тот момент, когда k становится равным точно 4, длина периода стремится к бесконечности и поведение системы становится полностью хаотичным (рис. 6, *г*). Применительно к рассматриваемому вопросу о трансгенерации это означает, что при увеличении коэффициента обратной связи в генераторе выше некоторого критического значения начинает происходить *деление* частоты генератора. При этом при соответствующей критической настройке возможно получение сколь угодно низких частот. Эти частоты находятся в весьма причудливых (хотя и целочисленных) отношениях с основной частотой генератора. Поэтому утверждение Лосева о том, что трансгенерация позволяет трансформировать частоту генератора в любом соотношении в области низких частот, является достаточно точным.

О. В. Лосев начал опыты по трансгенерации, стараясь исследовать схемные возможности кристадина. Однако очень скоро он осознал, что открытое им явление трансгенерации значительно проще изучать с помощью вакуумных ламп. Опыты по трансгенерации оторвали его от работы по исследованию генерирующего детектора почти на 2 года. К этому времени (1926 г.) электронные лампы достигают значительного технического совершенства. Непрерывно увеличивается их срок службы и снижается мощность, расходуемая на нагревание катода.

Изобретенный О. В. Лосевым кристадин был двухэлектродным устройством, что практически исключало создание на его основе многокаскадных усилителей и приемников, содержащих более чем два кристадина. А ведь к 1926 г. были созданы многоламповые супергетеродинные приемники, обладающие очень высокими параметрами даже по меркам нашего времени. Поэтому для того чтобы кристадин сохранил практическое значение, его нужно было усовершенствовать, а для этого было необходимо понять принцип его работы. О. В. Лосеву казалось, что ключом к разгадке может оказаться открытое им свечение, которое он наблюдал в карборундовом детекторе. Он приступает к систематическому исследованию этого свечения, открывавшего перед ним широкие горизонты новых физических явлений, и уже никогда не возвращается к цинкитному детектору.

Что же все-таки представлял собой кристадин с позиций современной физики? В настоящее время известно несколько полупроводниковых диодов, вольт-амперные характеристики которых обладают областью статического или динамического отрицательного сопротивления. Это диод Ганна, ЛПД-диоды, диоды с толстой базой и поверхностно-барьерные диоды с туннельно-тонким слоем окисла. Исходя из вольт-амперных характеристик, которые опубликованы Лосевым (одна из них представлена на рис. 7), можно сделать вывод, что участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением наблюдается в обратной ветви. Окись цинка, как известно, обладает проводимостью только

n-типа, поэтому в поверхностно-барьерном диоде вблизи контакта с металлом зоны загибаются вверх. Это согласуется с тем, что для наблюдения обратной ветви вольт-амперной характеристики к металлическому электроду должен быть приложен «минус», т. е. дело происходит именно так, как и было в опытах Лосева. Далее, напряжение «отсечки» диода значительно меньше ширины запрещенной зоны окиси цинка (E_g=3.2 эВ), что также типично для диодов Шоттки.

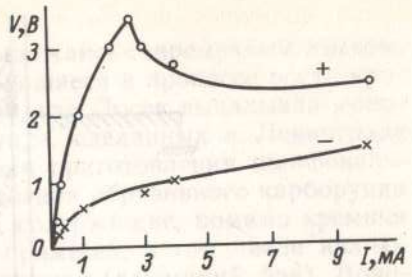


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика с отрицательным сопротивлением в обратной ветви [18].

Единственный известный в настоящее время механизм возникновения отрицательного сопротивления в обратной ветви был предложен в работе Б. С. Муравского и В. И. Кузнецова [Л. 12]. Для этого механизма существенным является наличие туннельно-тонкого слоя окисла, разделяющего металл и полупроводник.* В опытах О. В. Лосева наличие такого слоя более чем вероятно, особенно если учесть, что выбор «генерирующей» точки был трудным делом, что, возможно, и было связано с нахождением точки с подходящей толщиной окисла.** Рис. 8 поясняет сущность механизма, предложенного Б. С. Муравским. В сильном электрическом поле электроны, захваченные на границе окисел—полупроводник, освобождаются за счет туннельных переходов в зону проводимости окиси цинка, оставляя избыточный положительный заряд на поверхности полупроводника. Поле этого заряда создает некоторое падение потенциала в промежуточном между полупроводником и металлом слое, что приводит к понижению потенциального барьера для выхода электронов из металла в полупроводник.

Так как для обеспечения большой величины поля вблизи поверхности нужен низкоомный ZnO, то становится ясным, почему О. В. Лосев считал большую проводимость кристаллов обязательным условием возникновения колебаний в цепи. Приведенные рассуждения ни в коей мере не претендуют на окончательное решение вопроса о природе отрицательного сопротивления в диодах Лосева. Для окончательного решения вопроса, по-видимому,

* Так как полупроводник ZnO сам является окислом, то под окислом здесь мы подразумеваем поверхностный слой, имеющий состав, отличный от ZnO. Такие слои практически всегда присутствуют в контакте металл—полупроводник.

** При большой толщине окисла (примерно 5 нм и более) туннельный ток через окисел практически невозможен, напротив, при очень малой (менее 1 нм) туннельная прозрачность столь велика, что он не оказывает существенного влияния на ток.

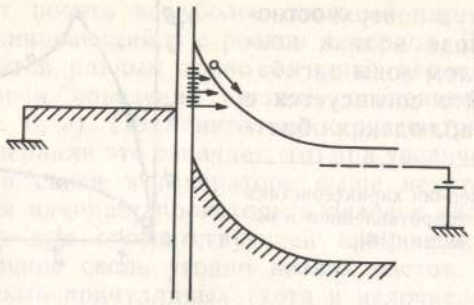


Рис. 8. Энергетическая схема МДП-структуры с поверхностными уровнями [Л. 12].

необходимо повторить опыты с цинкитным детектором с привлечением современной полупроводниковой технологии.

Закончив опыты с трансгенерацией, Лосев снова возвращается к своим исследованиям кристаллических детекторов. Теперь нужно было искать причину не только генерации, но и открытого им свечения кристаллов карбида кремния (карборунда) при пропускании через него электрического тока. Здесь начинается самая блестящая страница его замечательных открытий. Современные экспериментаторы, работающие в области физики полупроводников, опираются на мощный аппарат теории твердых тел. В каждом эксперименте ищется ответ на один или небольшое количество вопросов, при этом область заранее известного значительно больше той неизвестной области, для изучения которой ставится тот или иной эксперимент. Совсем другим было положение в конце 20-х годов. Квантовая механика сделала тогда лишь первые и весьма робкие шаги для объяснения природы твердых тел, а зонная теория твердых тел, являющаяся основой современной физики полупроводников, возникла лишь в начале 30-х годов. Более того, основные выводы работ Вильсона, в которых была дана современная классификация твердых тел на основе их зонного спектра [Л. 13, 14], фактически начали влиять на экспериментальную физику твердых тел лишь в середине 30-х годов. Поэтому не может не вызывать восхищение то, как О. В. Лосев раскрывает природу электролюминесценции и выпрямления в полупроводниках, опираясь лишь на логику эксперимента и весьма далекие аналогии с известными, но, как правило, не понятыми в то время экспериментальными фактами, касающимися некоторых свойств твердых тел. Был в опытах О. В. Лосева и элемент удачи, которая имеет свойство выпадать лишь на долю великих экспериментаторов. Кристаллы карборунда были еще более замечательной находкой О. В. Лосева, чем кристаллы окиси цинка. Однако еще раз заметим, что О. В. Лосевым было исследовано более дюжины различных соединений.

Многие образцы карбида кремния, используемые О. В. Лосевым, по-видимому, содержали, выражаясь современным языком, p—n-переходы, спонтанно образовавшиеся в процессе роста кристаллов из газовой фазы. Известно, что Лосев выкалывал монокристаллики из сростков карборунда, сделанных в Ленинграде на абразивном заводе «Ильич» для приготовления шлифовального порошка. Сырьем для изготовления абразивного карборунда служит кварцевый песок и шихта, содержащие, помимо кремния и углерода, большое количество примесей, в том числе являющихся акцепторами для карбида кремния (алюминий, бор). Донором для SiC является азот. Растворимость примесей в кристаллах по мере их роста на стенках камеры и для каждой примеси по-своему существенно зависит от температуры. Азот растворяется и при низких температурах, алюминий и бор — лучше растворяются при высоких температурах. Процесс ведется при температурах порядка 2500 °С. Если не применять специальных мер для удаления алюминия и бора или существенного их уменьшения в рабочем объеме, вырастают черные кристаллы дырочной проводимости. Применяя специальные химические приемы удаления примесей — акцепторов, можно получить кристаллы зеленого цвета электронной проводимости. Интенсивность зеленого цвета определяется количеством растворенного в SiC азота.

Изменения температуры в процессе технологического цикла приводят к сложному распределению донорных и акцепторных примесей внутри растущих кристаллов. Это абсолютно не сказывается на абразивных свойствах карборунда. Легко представить себе, что у Лосева среди кристаллов были и такие, у которых на ранее выросших кристаллах одного знака проводимости были слои другого знака проводимости — кристаллы с непроизвольно выращенными p—n-структурами. Образующиеся таким образом p—n-переходы по своим свойствам близки к современным, получаемым методом эпитаксиального выращивания.*

В статье [29], направленной в редакцию журнала ТиТбп 14 июня 1927 г., О. В. Лосев приводит результаты экспериментов, которые показывают, что существует два вида свечения: свечение I и свечение II.

Свечение I (именно этот вид свечения был открыт им в 1924 г. [18]), по современной терминологии, является предпробойным свечением, а свечение II обладает всеми свойствами инжекционной люминесценции. Приведем с небольшими комментариями выдержки из указанной выше статьи. «Из многих наблюдений выяснилось, что можно различать (более или менее искусственно) два вида свечения карборундового контакта.

„Свечение I“ — зеленовато-голубоватое, яркая маленькая точка (иногда несколько точек), вокруг которой расплывчатое свечение меньшей яркости. (Расплывчатость обусловлена отражением света от ближайших граней кристалла). Цвет свечения заметно не меняется с изменением разности потенциалов на

* Авторы благодарят Ю. А. Водакова за полезное обсуждение этого вопроса.

зажимах детектора. При том направлении тока, при котором свечение I более интенсивно, детектор имеет меньшую проводимость... В первоначальных наблюдениях, описанных в [5, 18],* фигурировало только свечение I» [29, с. 485].

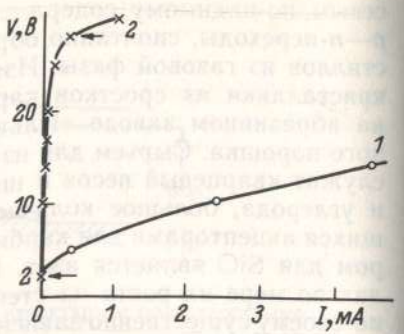


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика светящегося контакта карборунд—металл.

1 — прямая ветвь; *2* — обратная. *Стрелками* показаны значения тока, при котором свечение становится заметным глазом [29].

Таким образом, Лосев здесь приводит два основных отличительных признака предпробойного свечения: его большую локализацию и независимость цвета от тока через контакт. Вольт-амперная характеристика одного из контактов представлена на рис. 9.

«При свечении II проводимость контакта меньшая именно при обратном направлении тока, при котором свечение менее интенсивно (рис. 9)... Ярко флуоресцирует значительная поверхность кристалла, выходящая иногда далеко за пределы места касания с контактной проволочкой. Цвет свечения II изменяется с изменением разности потенциалов на зажимах детектора (от оранжевого до фиолетового) примерно так, как указано ниже (несколько различно для различных точек одного и того же кристалла).

Цвет свечения по визуальной оценке	Напряжение на зажимах детектора, В
оранжевый	6
желтый	10
светло-желтый	20
зеленоватый	26
фиолетовый	28

Следует отметить, что непосредственной причиной изменения цвета, по-видимому, является изменение температуры флуоресцирующей поверхности кристалла,** зависящей от выделения в контакте тепла Джоуля. Об этом говорят изменения цвета свечения II при нагревании светящегося детектора извне» [29, с. 486, 487].

Далее Лосев объясняет, почему в первых опытах наблюдалось только свечение I, т. е. пробойное свечение: «Мы пользовались кристаллами карборунда четырех сортов. С кристаллами сортов 1 и 2 (куски, состоящие из зеленоватых, прозрачных, мелких и более крупных кристаллов) можно было получать только свечение I. С кристаллами сортов 3 и 4 (куски крупных кристаллов, лиловато-зеленовато-сероватых или серых) можно было получать одинаково легко для одного и того же кристалла и свечение I, и свечение II. Кристаллы были вплавлены оловом в металлические чашечки. Употреблялись стальные, никелевые, танталовые и серебряные контактные проволочки, заметной разницы в действии между ними не было» [29, с. 487].

* Нумерация литературы и рисунков дана авторами статьи.

** Здесь О. В. Лосев делает ссылку на работы А. Беккереля об изменении цвета флуоресценции при изменении температуры.

Объяснение изменения цвета свечения при увеличении тока нагреванием кристалла Лосев скоро отбрасывает как ошибочное: «В микроскоп можно хорошо видеть, что светящаяся поверхность совершенно не накалена (например, капелька бензина, нанесенная в месте свечения, долго не испаряется). Конечно, если пропускать через контакт слишком сильный ток (свыше 20 мА), часть кристалла, близкая к контактной проволочке, начинает накаляться докрасна» [29, с. 487, 488]. Тут же О. В. Лосев делает еще один важный вывод: «Инерция возникновения и затухания свечения даже при наиболее сильных допустимых токах через контакт чрезвычайно мала» [29, с. 488]. Этим он отделяет процесс свечения в карборундовом детекторе от процессов, происходящих в известных в то время люминофорах. «Вопрос в том, что происходит в светящемся карборундовом контакте — электронный разряд в слое адсорбированного газа или, быть может, в самом поверхностном слое вещества кристалла, остается открытым. Свечение II, по-видимому, отражает флуоресценцию вещества кристалла, происходящую под действием гипотетического электронного разряда. (Для нас безразлично, флуоресцирует ли само вещество карборунда или какие-либо примеси)» [29, с. 488].

Идея о том, что свечение II (или инжекционная люминесценция, по современной терминологии) и флуоресценция (люминесценция) имеют общую природу, успешно развивалась О. В. Лосевым в его последующих работах. Как и в случае цинкитного детектора, Лосев проводит опыт по исследованию влияния сильного магнитного поля на работу карборундового детектора. Результат этого опыта таков: «Магнитное поле порядка 10 000 Гс не оказывает заметного влияния на детекторное свечение. Вероятно, это следует объяснить чрезвычайно малой длиной электронного разряда в контакте» [29, с. 489]. Проводятся и другие опыты: «При погружении в бензин светящийся детектор почти всегда начинал светиться несколько слабее, чем в воздухе, в микроскоп можно было наблюдать, что поверхность свечения I в бензине заметно уменьшалась. После высыхания бензина свечение принимало первоначальные размеры... Свечение II при погружении детектора в бензин изменялось в меньшей степени» [29, с. 489].

В следующем разделе статьи, озаглавленной «Сравнение детекторного свечения со свечением карборунда в эвакуированной

трубке под действием катодных лучей. Спектр детекторного свечения и катодолюминесценции», О. В. Лосев писал: «Казалось, небезынтересным поместить несколько различных кристаллов в трубку и эвакуировать ее; в случае, если они будут светиться, сравнить катодолюминесценцию со свечением в контакте. В трубку были помещены кристаллы сортов 1 и 2 карборунда, двух сортов цинкита и двух сортов железного блеска. Сильно флуоресцировали только оба сорта карборунда, цинкит и железный блеск почти совершенно не светились.

Детекторное свечение II более сравнимо, чем I, с катодолюминесценцией карборунда в трубке. Выяснилось, что и в трубке можно получить такое же изменение цвета катодолюминесценции карборунда, как при детекторном свечении II. С размягчением трубки (при увеличении давления газа в ней) цвет катодолюминесценции постепенно переходит от оранжевого к фиолетовому.

Спектр контактного карборундового свечения сплошной, со слабовыраженной красной частью. При свечении II с увеличением разности потенциалов на зажимах детектора относительная яркость частей спектра увеличивается в области коротких световых волн.

Спектр при свечении карборунда в эвакуированной трубке чрезвычайно похож на спектр контактного свечения (особенно свечения II)» [29, с. 490].

Анализируя разницу вольт-амперных характеристик при свечениях I и II, Лосев приходит к выводу, что «удобно предположить для свечения II увеличение проводимости флуоресцирующего слоя, весьма большая поверхность которого характерна именно для свечения II под действием электронного разряда в контакте. Это предположение было высказано и проф. Б. А. Остроумовым по аналогии с известным фактом увеличения проводимости катодолюминесцирующих твердых тел в вакуумной трубке. Представляется возможным распространить влияние эффекта увеличения проводимости близкого к контакту слоя кристалла на действие некоторых других контактных детекторов (несветящихся) и складывать его с эффектом свойств самого гипотетического электронного разряда» [29, с. 490]. Таким образом, здесь О. В. Лосев впервые формулирует идею объяснения выпрямляющего действия детекторов увеличением проводимости близкого к контактам слоя вещества.

Свечение, наблюдаемое О. В. Лосевым, было достаточно интенсивным для практических применений. Более того, оно оказалось чрезвычайно малоинерционным: «Если рассматривать карборундовое свечение I и II во вращающемся зеркале, пропуская через контакт переменный ток, можно совершенно отчетливо видеть при частоте около 78 500 Гц отдельные вспышки (ток через контакт пропускался порядка 0.23 А — среднеквадратичное значение). Частота 78 500 Гц являлась пределом разрешающей способности установки вращающегося зеркала, а не инерционности свечения» [29, с. 493]. Грубая оценка эффективности созданного О. В. Лосевым светодиода может быть получена исходя из того, что в этой же статье сообщается о записи изменения интенсивности излучения диода во времени на движущейся фотопластине. Частота тока была 500 Гц, а чувствительность фотопластинки составляла примерно 400 ед. Х и Д, или 20 ед. ГОСТа. Оценка показывает, что при токе через диод, равном 0.1 А, кпд преобразования должен быть примерно в 10 раз меньше, чем у современных светодиодов из карбида кремния.

Следующая статья О. В. Лосева [31] ясно показывает, в каком направлении развивалась точка зрения О. В. Лосева на природу возникновения свечения и выпрямления в карборундовом детекторе. Лосев доказал, что существует некоторая аналогия свечения детектора и испускания рентгеновских лучей быстрыми электронами. Тогда наибольшая частота испускаемого света должна подчиняться уравнению $eV=h\nu$, где V — приложенное к диоду напряжение. Это согласуется с обнаруженным им фактом, что при разности потенциалов на зажимах детектора ниже 2 В в нормальных условиях детекторного контакта невозможно наблюдать видимые свечения I и II. Разность потенциалов, соответствующая наибольшей длине волн, еще видимых глазом, по подсчетам Лосева, составила 1.62 В. Для правильного сравнения положения коротковолновой границы с приложенным напряжением Лосев учитывает падение напряжения в толще кристалла, которое, по его мнению, необходимо вычесть из приложенного напряжения для того, чтобы определить истинное падение напряжения на контакте. О. В. Лосев рассматривает свечение в кристалле как процесс, обратный внешнему фотоэффекту, т. е. быстрый электрон рождает квант света с энергией, меньшей или равной его кинетической энергии.

Эта точка зрения разделялась и акад. А. Ф. Иоффе, который считал обнаруженное Лосевым излучение аналогом рентгеновского тормозного излучения. В письме П. С. Эренфесту, датированному 16 мая 1930 г., он писал: «В научном отношении у меня ряд успехов. 1. Я тебе говорил, что хочу развить электронную теорию проводников с малым числом электронов — освещенной каменной соли. . . 5. Лосев получил в карборунде и других кристаллах свечение под действием электронов в 2—6 В. Граница свечения в спектре ограничена $h\nu = eV$. Ultraviolett Bremstrahlung,* по-видимому. В пустоте с пучком электронов мы пока дошли до 18 В, по-видимому, удастся дойти, как и в воздухе, до тех же вольт» [Л. 15, с. 286].

Первые результаты, полученные Лосевым, оказались обнадеживающими, но у него были и сомнения: «Конечно, — писал он, — утверждать это окончательно еще не представляется возможным. Необходимо проследить перемещение края спектра $\lambda_{мин}$ в зависимости от изменения V с хорошим спектрографом» [31, с. 155].

---

* Ультрафиолетовое тормозное излучение. (*Прим. авт.*).

Но в лаборатории подходящего спектрографа не было. Как раз во время работы над этой статьей НРЛ переезжает в Ленинград, и у О. В. Лосева появляется доступ к значительно более совершенному оптическому оборудованию, которым располагал ФТИ. Есть основания полагать, что спектральные исследования с использованием широкого диапазона температур (от температуры жидкого воздуха до 600 °С) Лосев проводил в ЛФТИ в лаборатории Б. П. Вейнберга. При этом большую помощь ему оказывал проф. Л. Н. Салтыков, коллега Лосева по НРЛ, который перешел в ЛФТИ за несколько лет до этого. О. В. Лосев понимал ограниченность аналогии с испусканием рентгеновских лучей: «Свечение II, — писал он, — по-видимому, происходит не от превращения в световые кванты энергии первичных электронов, но вследствие флуоресценции вещества кристалла (SiC или каких-либо примесей). Здесь можно наблюдать отступление от известного закона Стокса, аналогичное тому, которое происходит при фотолюминесценции.

В нормальных условиях свечение II ниже, чем при $V=2$ В, не наблюдалось. Но при нагревании кристалла внешним нагревателем до температуры темно-красного каления в двух случаях (из нескольких десятков наблюдений) свечение II переставало быть заметным только при 1.52 и 1.60 В на зажимах детектора (т. е. ниже напряжения 1.62 В, вычисленного как предел для частот, видимых глазом).

Правда, в случае нагретого докрасна кристалла сопротивление толщи чрезвычайно мало (действует отрицательный температурный коэффициент сопротивления) и почти вся величина V падает в активном месте контакта. Но при нагретом докрасна кристалле свечение II вплоть до самого исчезновения имеет фиолетовый оттенок (см. таблицу). Наблюдения при нагретом кристалле производились с бинокулярной лупой» [31, с. 155].

Номер точек кристалла в порядке наблюдения	Сила тока через детектор		Цвет свечения		
	без нагревания, мА	при повышении т-ры до темно-красного каления, мА	без нагревания	при повышении т-ры до т-ры красного каления	без нагревания при тех же значениях силы тока, что и в гр. 3
1	2	3	4	5	6
1	40	70	Темно-зеленый	Фиолетовый	Светло-зеленый
2	10	24	То же	То же	То же
3	74	110	Желтый	» »	Светло-желтый
4	60	80	Темно-зеленый	» »	Светло-зеленый

«Как и в случае отступления от закона Стокса при фотолюминесценции, одновременно с поглощенной энергией движущегося электрона, вероятно, может перейти в испускаемую лучистую энергию часть другой, уже существующей в молекуле энергии;

в особенности это может иметь место при высокой температуре» [31, с. 156].

Таким образом, мы видим, что О. В. Лосев дает феноменологически правильное описание инжекционной люминесценции. Но что является причиной столь разительной аналогии между фотолюминесценцией и излучением детектора, в чем связь этих процессов с выпрямлением и генерацией высокочастотных колебаний, наблюдаемых на контуре? Эти вопросы не дают Лосеву покоя. Ответ на них он не находит, но высказывает предположение, что, по-видимому, носители тока образуются в кристаллической решетке не только при повышении температуры, но и под действием электрических полей или аналогично ударной ионизации в диэлектриках. Тогда, по его предположению, «падающий» участок вольт-амперной характеристики контакта связан с интенсивным освобождением вторичных электронов при достаточно большой разности потенциалов в активном участке кристалла. Получение высокочастотных незатухающих колебаний (до $1.23 \cdot 10^7$ Гц, [8]) убеждает его, что соответствующие процессы в кристалле обладают весьма малыми временами релаксации [31].

Природа первичного электронного процесса, освобождающего электроны в активной области, остается неясной. Некоторые современники Лосева считали, что вызывающие ударную ионизацию электроны рождаются вне кристалла. Он не был согласен с такой точкой зрения. Более того, он не считал ударную ионизацию единственно возможным процессом.

Заключение статьи Лосева кажется пророческим: «Если считать, что первичный электронный процесс происходит не в адсорбированном газе, но в самой кристаллической решетке, то в случае светящегося карборундового детектора не исключена вероятность наблюдения картины, напоминающей рентгенограммы Лауэ, обязанной „связанным“ с электронами фазовым волнам Л. де Бройля соответствующей частоты» [31, с. 158]. Что здесь имел в виду О. В. Лосев? Теперь мы хорошо знаем, что интерференция «фазовых волн Л. де Бройля» определяет энергетический спектр кристалла.

Опыты с изменением проводимости выдвинули на первый план вопрос о строении того слоя кристалла, в котором происходит свечение, выпрямление, генерирование. В 1930—1931 гг. Лосев на высочайшем экспериментальном уровне выполняет серию опытов с косым шлифом, «растягивающим» исследуемую область, и системой электродов, включаемых в компенсационную измерительную схему. Он показал, что поверхностный слой кристалла с малым удельным сопротивлением, обеспечивающим растекание тока, сменяется по мере углубления в кристалл слоем с большим сопротивлением. Эти измерения позволили ему оценить толщину слоя кристалла, в котором разыгрываются процессы, обусловливающие свечение II в 10^4—10^5 атомных слоев кристаллической решетки, и высказать предположение, что причиной униполярной

проводимости является неодинаковость в условиях движения электронов в поле по обе стороны от активного слоя. Только при одном направлении движения электроны успевают набрать энергию, достаточную для преодоления отрицательного объемного заряда активного слоя. «При токе обратного направления происходит процесс ударного освобождения электронов, создающий падение потенциала, аналогичное катодному» [38, с. 251].

Это, как казалось Лосеву, неминуемо должно сказаться на величине удельного сопротивления активных слоев. Он ищет и находит изменение проводимости, близкой к контакту области кристалла, где, по его убеждению, локально происходит увеличение концентрации носителей тока «вследствие проникновения свободных электронов в плохопроводящие слои» [38, с. 251]. Разместив в этой области кристалла 4 электрода, он вполне корректно радиотехническими методами (рис. 10) убедительно показывает, что увеличение проводимости действительно есть, что примерно одинаковые результаты получаются на звуковых и высоких частотах ($\lambda = 1400$ м), а это «указывает на весьма малую инерцию изменения проводимости, что вряд ли можно было бы объяснить изменениями температурной проводимости» [38, с. 252]. Эти результаты были доложены Лосевым на научно-технической беседе Центральной радиолаборатории (ЦРЛ) 18 июля 1930 г. и от имени двух ленинградских учреждений ЦРЛ и ГФТРИ опубликованы в «Вестнике электротехники». По существу Лосев был здесь чрезвычайно близок к реализации транзистора, так как им было обнаружено изменение проводимости между парой контактов, когда через другую пару пропущен электрический ток. Это, как известно, является сущностью транзисторного действия. Однако

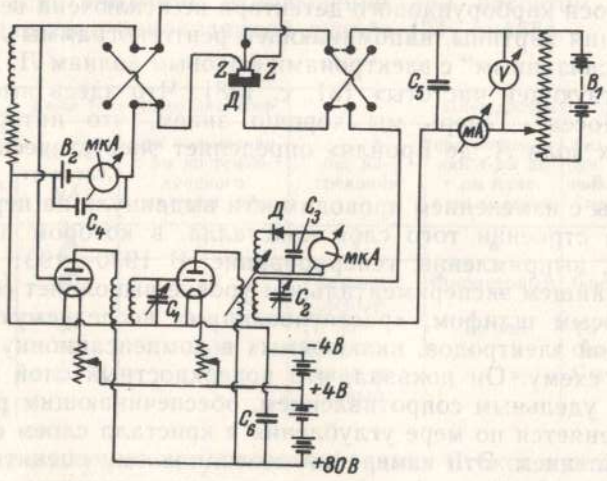


Рис. 10. Схема для наблюдения изменения проводимости активного слоя. На кристалле карбида кремния размещены 4 электрода [38].

коэффициент передачи тока был порядка 0.01, что не достаточно для получения усиления. Уместно заметить, что карбид кремния был чрезвычайно трудным материалом для таких опытов и биполярный транзистор на нем был сделан лишь в самые последние годы при значительных технологических трудностях.

Работы по обнаружению и исследованию электролюминесценции, начатые еще в НРЛ и продолженные в Ленинграде, привели Лосева к потребности исследовать процесс образования тока при освещении детектора. Еще в 1924 г., изучая влияние подсветки на свечение карборунда, он обратил внимание на изменение тока при освещении детектора. Тогда он не смог уделить времени изучению этого эффекта. В дальнейшем Лосев не раз пробовал интенсивно осветить активный слой кристалла карборунда, и в 1929 г. установил, что в этом слое действительно возникает фотоэлектродвижущая сила, создающая во внешней цепи ток в направлении, обратном току большой проводимости. У него возник вопрос, а не имеет ли эдс, возникающая при освещении, термоэлектрическую природу. Лосев определил знак термоэдс и измерил ее величину. Оказалось, что термоэдс имеет знак, противоположный фотоэлектродвижущей силе. Опыты с прерываемым освещением (2000 Гц) подтвердили фотоэлектродвижущую природу тока при освещении. Сошлифовав активный слой до толщины 1—3 мкм, т. е. до значения предполагаемой длины свободного пробега электронов в слое, Лосев получил значение фотоэдс в 3.4 В. Это позволило ему сделать вывод о том, что источники фотоэдс расположены не равномерно по глубине кристалла, а локализованы на границе активного слоя и толщи материала [40]. Такой вывод согласуется с высказанным им ранее предположением о малой концентрации свободных электронов в активном слое и большой концентрации их в остальной толще кристалла [38]. При полном удалении активного слоя фотоэдс наблюдать уже не удавалось. В процессе этих опытов Лосев на порошковообразных объектах обнаружил фотоэдс, названную им емкостной [41, 45].

Задавшись целью выбрать материал для изготовления вентильных фотоэлементов и фотосопротивлений, он исследовал на фоточувствительность более 90 веществ [41]. Ему удалось, в частности, установить заметную фоточувствительность у кремния. Уже после смерти Лосева, спустя много лет после выхода в свет его работы [41], эти свойства кремния вновь привлекли к себе внимание и сделались предметом исследований большого числа авторов.

Работы Лосева по исследованию полупроводников приобрели широкую известность. Он печатался в ряде отечественных и иностранных журналов: «Вестник электротехники», «ЖЭТФ», «Доклады АН СССР», «Известия АН СССР» и др., «Radio Revue», «Philosophikal Magasine», «Physicalische Zeitschrift» и др. Его приглашали выступать с докладами о проведенных им работах на 1-й (Ленинград), 2-й (Киев) и 3-й (Одесса) всесоюзных

конференциях по твердым выпрямителям и фотоэлементам. Благодаря новизне подхода, оригинальности экспериментальных методов все его сообщения вызывали неизменный интерес слушателей. В 1931 г. его работы в области полупроводников были премированы Комиссией Наркомпроса по конкурсу лучших работ по физике.

Работая в отраслевом радиотехническом учреждении (ЦРЛ, которая позднее стала называться Институтом радиовещательного приема и акустики), Лосев со своей тематикой оторвался от его чисто практических задач. Для него возник вопрос о необходимости либо изменить направление своей научной работы, либо покинуть институт. По-видимому, Лосев не смог отказаться от продолжения исследования полупроводников, приближающих его к разрешению проблем детектирования, фотоэффекта и генерации электрических колебаний. Он решил покинуть отраслевой институт и в 1937 г. перешел на педагогическую работу в 1-й Ленинградский медицинский институт, где надеялся продолжить свои эксперименты.* Этот период был трудным для О. В. Лосева. С 1935 по 1940 г. ему не удалось опубликовать ни одной статьи. Служебное положение Лосева осложнялось отсутствием у него диплома о высшем образовании. В то время практиковалось присуждение ученых степеней исследователям, имевшим печатные работы и внесшим серьезный вклад в науку без защиты диссертации. Друзья уговорили Олега Владимировича подготовить документы для получения ученой степени. Он собрал часть своих работ (21 статью и 12 авторских свидетельств) и подал их в совет Ленинградского индустриального института (ныне ЛПИ им. М. И. Калинина). Работы представлял Совету А. Ф. Иоффе. 25 июня 1938 г. на заседании инженерно-физического факультета рассматривался вопрос о присуждении ученой степени О. В. Лосеву. Заседание факультета постановило (за — 10, против — 0, воздержалось — 0) утвердить О. В. Лосева в ученой степени кандидата физико-математических наук. А через несколько дней, 2 июля 1938 г., Ученый совет Индустриального института, «заслушав и обсудив заключение рецензента и постановление Совета инженерно-физического факультета, постановил: присвоить тов. Лосеву Олегу Владимировичу ученую степень кандидата физико-математических наук без защиты диссертации». Это было заслуженным итогом многолетней плодотворной научной работы.

«Я не разделяю часто цитируемого юмора Н. А. Никитина, Л. Н. Салтыкова и других, — пишет американец Игон Лобнер, — которые находили забавным, что иностранцы принимают 22-летнего Лосева за профессора. Для меня, вне зависимости от его возраста, лосевские статьи не отличимы от статей зрелых, опытных и квалифицированных физиков, занимающихся экспериментальными устройствами. По моему мнению, присуждение ему степени кандидата без формального представления диссертации институтом Иоффе в 1938 году не было актом милости». Далее он пишет: «Его экспериментальная методология была в основном той же, что и мы использовали в лаборатории Ар Си Эй в 1958 и 1959 годах, работая с выращенными из расплава монокристаллами фосфида галлия» [Л. 16, с. 677, 678].

Тем временем в работах Б. М. Гохберга в ЛФТИ было показано, что зеленый карборунд обладает электронной проводимостью, а черный — дырочной, работами В. Е. Лашкарева и В. П. Жузе установлено существование запорных слоев в фотоэлементах и выпрямителях на других материалах. Сопоставление результатов этих исследований с результатами других авторов позволило Лосеву составить суждение о том, что «активный слой» в его экспериментах есть поверхность, по которой в кристалле сопряжены области с различным типом проводимости [48].

Увлеченный работой, стремясь закончить свою последнюю статью, посланную в ЖЭТФ в конце 1941 г., но затерявшуюся в трудных военных условиях, Лосев не успел своевременно эвакуироваться. О. В. Лосев разделил участь многих ленинградцев. В начале 1942 г. его не стало.

Если отсчитывать век полупроводниковой электроники от того момента, когда при помощи кристаллических устройств удалось генерировать и усиливать электромагнитные колебания, то ее колыбелью следует назвать Нижегородскую радиолабораторию им. В. И. Ленина, а датой рождения — опубликование в июне 1922 г. в журнале «Телефония и телеграфия без проводов» статьи «Детектор-генератор, детектор-усилитель» сотрудника этой лаборатории Олега Владимировича Лосева.

СТАТЬИ И АВТОРСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА НА ИЗОБРЕТЕНИЯ О. В. ЛОСЕВА *

1*. О магнитных усилителях. — Телефония и телеграфия без проводов,** 1922, № 11, с. 131—133.
2*. Детектор-генератор; детектор-усилитель. — ТиТбп, 1922, № 14, с. 374—386.
3. *Пат. 996 (РСФСР)*. Способ генерирования незатухающих колебаний. — Заявка № 75317, 21.02.22.
4. Генерирующие точки кристалла. — ТиТбп, 1922, № 15, с. 564—569.
5*. Действие контактных детекторов: влияние температуры на генерирующий контакт. — ТиТбп, 1923, № 18, с. 45—62.
6. *Пат. 496 (СССР)*. Способ изготовления цинкитного детектора. — Заявка № 76844, 11.04.23.
7. Детекторный гетеродин и усилитель. — Техника связи, 1923, № 4, 5, с. 56—58.
8*. Получение коротких волн от генерирующего контактного детектора. — ТиТбп, 1923, № 21, с. 349—352.
9. *Пат. 472 (СССР)*. Устройство для нахождения генерирующих точек контактного детектора. — Заявка № 77717, 18.12.23.

* В 1933 г. после В. К. Лебединского кафедру физики там возглавил С. М. Токмачев и заведовал ею до 1942 г.

* Звездочкой отмечены работы, упоминаемые в настоящей статье.

** В дальнейшем — ТиТбп.

10. *Пат. 467* (*СССР*). Детекторный радиоприемник-гетеродин. — Заявка от 18.12.23.
11. Способ быстрого нахождения генерирующих точек у детектора гетеродина. — ТиТбп, 1923, № 22, с. 506—507.
12. Нижегородские радиолюбители и детектор-генератор. — ТиТбп, 1923, № 22, с. 482—483.
13. Схема детекторного приемника-гетеродина с одним детектором. — ТиТбп, 1923, № 22, с. 507—508.
14*. Oscillatory Crystals. — Wireless World Radio Rev., 1924, **15**, 271, p. 93—96.
15*. Кристадин / Под ред. В. К. Лебединского. Нижний Новгород, Изд-во НРЛ, 1924.
16. Новый способ обезгаживания катодных ламп. — ТиТбп, 1923, № 23, с. 93.
17. Любительская постройка детекторного приемника-гетеродина. — ТиТбп, 1924. № 24. с. 206—210.
18*. Дальнейшее исследование процессов в генерирующем контакте. — ТиТбп, 1924, № 26, с. 404—411.
19*. Der Krystadyne. — Z. Fernmeldetechn. Geratebau, 1925, **9**, S. 132—134.
20. *Доп. пат. 3773* (*СССР*). Способ радиоприема на рамку. — Заявка от 29.03.26 (К пат.: Детекторный радиоприемник-гетеродин).
21. *Пат. 4904* (*СССР*). Способ регулирования регенерации в кристадинных приемниках. — Заявка от 29.03.26.
22. Oscellerende Krystalle. — Z. Fernmeldetechnik Geratebau, 1927, **7**, S. 97—100.
23. *Пат. 6068* (*СССР*). Способ прерывания основной частоты катодного генератора. — Заявка от 20.08.26.
24. *А. с. 29875* (*СССР*). — Способ трансформации частоты. 09.10.26.
25*. Трансгенерация. — ТиТбп., 1926, № 5 (38), с. 436—448.
26. *Пат. 11101* (*СССР*). Способ предотвращения возникновения электрических колебаний в приемных контурах междуламповых трансформаторов низкой частоты. — Заявка от 28.02.27.
27. *Пат. 12191* (*СССР*). Световое реле. — Заявка от 28.02.27.
28. О «нетомсоновских» колебаниях. — ТиТбп, 1927. № 4 (38), с. 485—494.
29*. Светящийся карборундовый детектор и детектирование с кристаллами. — ТиТбп, 1927, № 5 (44), с. 485—494.
30. Luminous carborundum detector and detection effect and oscillation with crystals. — Phil. Mag., 1928, **6**, p. 1024—1044.
31*. Влияние температуры на светящийся карборундовый контакт: О приложении уравнения теории квант к явлению свечения детектора. — ТиТбп, 1929, № 2 (53), с. 153—161.
32. О приложении уравнения теории квант к явлениям свечения детектора. — Сб.: Физика и производство. Л., ЛПИ, 1929, с. 43—46.
33. Über die Anvendung der Quantentheorie zur Leuchtenerscheinungen am Karborundumdetektor. — Phis. Z., 1929, **30**, № 24, S. 920—923.
34. *А. с. 28548* (*СССР*). Электролитический выпрямитель. — Заявка от 27.11.30.
35. Фотоэлектрический эффект в любом активном слое карборунда. — ЖТФ, 1931, **1**, вып. 7, с. 718—724.
36. *А. с. 25657* (*СССР*). Световое реле. — Заявка от 26.02.31.
37. *А. с. 33231* (*СССР*). Контактный выпрямитель. — Заявка от 29.04.31.
38*. Свечение II: электропроводность карборунда и униполярная проводимость детекторов. — Вестник электротехники, 1931, № 8, с. 247—255.
39. Leuchten II des Karborundumdetektors, elektrische Leitfähigkeit des Karborundums und unipolare Leitfähigkeit der Krystalldetektoren. — Phys. Z., 1931, S. 692—696.
40*. О фотоактивных и детектирующих слоях у кристаллов карборунда и кристаллов некоторых других полупроводников. — Техника радио и слабого тока, 1932, **2**, с. 121—139.
41*. Фотоэлементы, аналогичные селеновым, емкостной эффект, исследование инерционности. — Техн. отчет по наряду 6059 за 1933 г. Библ. ЦРЛ. Центр. музей связи им. А. С. Попова.
42. Über den lichtelektrischen Effekt in besonderer aktiven Schicht der Karborundumkrystalle. — Phys. Z. 1933, **34**, S. 397—403.

43. *А. с. 32067* (*СССР*). Способ изготовления фотосопротивлений. — Заявка от 08.05.33.
44. *А. с. 39883* (*СССР*). Способ изготовления фотосопротивлений. — Заявка от 21.01.34.
45*. Фотоэффект емкостного типа у кремниевых фотосопротивлений. — Изв. электропром. слабого тока, 1935, № 3, с. 38—40.
46. Новый спектральный эффект при вентильном фотоэлектрическом эффекте в монокристаллах карборунда и новый метод определения красной границы вентильного фотоэффекта. — ДАН СССР, 1940, **29**, № 5, 6, с. 360—362.
47. Спектральное определение вентильного фотоэффекта в монокристаллах карборунда. — ДАН СССР, 1940, **29**, № 5, 6, с. 363—364.
48*. Новый спектральный эффект и метод определения красной границы фотоэффекта в кристаллах карборунда. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1941, № 4, 5, с. 494—499.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Остроумов Г. А.* Олег Владимирович Лосев: Биобиблиографический очерк. — В сб.: У истоков полупроводниковой техники. Л.: Наука, 1972, с. 175—194.
2. *Eccles W. H.* On Coherers. — Phil. Mag., 1910, **20**, № 64, p. 869—888.
3. *Васильев А. М.* Развитие беспроволочной телефонии. — Радиотехник, 1920, № 13, с. 207—229.
4. Детектор-генератор / Ред. заметка. — ТиТбп, 1922, № 13, с. 350.
5. Кристаллический детектор-гетеродин / Ред. заметка. — ТиТбп, 1923, № 20, с. 326.
6. Германские гости в НРЛ / Ред. заметка. — ТиТбп, 1923, № 22, с. 530.
7. Кристаллический детектор-гетеродин за границей / Ред. заметка. — ТиТбп, 1924, № 25, с. 329; Кристадин за границей / Ред. заметка. — ТиТбп, 1924, № 26, с. 432—433.
8. *Остроумов Б. А.* В. И. Ленин и Нижегородская радиолаборатория: История лаборатории в документах и материалах. Л.: Наука, 1967.
9. *Остроумов Г. А.* К вопросу о генерирующем кристалле. — ТиТбп, 1924, № 4, с. 204, 205.
10. *Фейгенбаум М.* Универсальность в поведении нелинейных систем. — УФН, 1983, **141**, вып. 2, с. 343—374.
11. *Kadanoff L. P.* Roads to chaos. — Phys. Today, 1983, **36**, № 12, p. 46—53.
12. *Муравский Б. С., Кузнецов В. И.* Холодная эмиссия с поверхностных состояний и отрицательное сопротивление в контакте металл—полупроводник. — В кн.: Некоторые вопросы общей и теоретической физики и математики: Науч. тр.: № 98. Краснодар, КГПИ, 1968, с. 272—276.
13. *Wilson A. H.* The theory of electronic semiconductors. — Proc. Roy. Soc., 1931, **A133**, № 822, p. 458—492.
14. *Wilson A. H.* The optical properties of solids. — Proc. Roy. Soc., 1935, **A151**, № 873, p. 274—296.
15. *Эренфест—Иоффе.* Научная переписка: 1907—1933 г. Л.: Наука, 1973.
16. *Loebner E.* Subhistories of light emiting diode. — IEEE Trans. Electron Devices, 1976, **ED—23**, № 7, p. 675—700.

В. Паули

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И АТОМНОЙ ФИЗИКЕ *

Свою лекцию, посвященную законам сохранения в старой и новой физике, а предполагаю разбить на три части. В первой

* Лекция, прочитанная в Университете физико-химии и химической технологии им. акад. Н. Д. Зелинского 27 октября 1937 г. Перев. с нем. проф. И. Е. Тамма.

части речь будет идти о законах сохранения в механике точки, причем мы начнем рассмотрение с классической механики и перейдем затем к механике релятивистской. Вторая часть будет посвящена физике поля, причем в ней рассмотрим как учение об электричестве, так и общую теорию относительности. Наконец, в третьей части перейдем к новейшей атомной физике и, в частности, к физике атомного ядра.

В механике точки особо важную роль играют два понятия. Во-первых, понятие импульса, или количества движения. Импульс частицы, обладающей массой m и скоростью v, равен mv. Импульс частицы является величиной направленной, или векторной. Другим важнейшим понятием механики точки является кинетическая энергия $^1/_2 mv^2$, величина ненаправленная, или скалярная. Для отличия векторных величин от скалярных их можно отмечать либо стрелкой $m\vec{v}$, либо жирным шрифтом $m\mathbf{v}$.

В связи с этими хорошо известными понятиями импульса и энергии я хотел бы сделать несколько замечаний принципиального характера.

Известен большой философский спор между двумя философскими школами XVII в., между последователями Лейбница, с одной стороны, и последователями Декарта — с другой, относительно того, какая из этих двух величин — количество движения или энергия — являются наиболее существенными и важными.

Последователи Декарта утверждали, что $m\mathbf{v}$, т. е. количество движения, является истинной мерой движения. Последователи же Лейбница считали истинной мерой движения $\frac{mv^2}{2}$, т. е. кинетическую энергию.

Подобные споры между философскими школами в результате дальнейшего развития науки часто оказывались бессодержательными. Так произошло и в данном случае, ибо оба понятия — импульса и энергии — оказались равно важными и одинаково существенными. Однако представлялось неудовлетворительным, что приходилось иметь дело с двумя различными, не связанными между собой характеристиками движения: импульсом и энергией, величиной векторной и величиной скалярной, и с двумя различными законами сохранения — сохранением импульса и сохранением энергии. Замечательно, что еще в XVII в. Гюйгенс в своем сочинении «De percussione» («Об ударе») указал на взаимную связь этих законов.

Если применить закон сохранения кинетической энергии к системе соударяющихся тел и потребовать, чтобы сохранение энергии имело место при добавлении к скорости каждого тела произвольной, но одинаковой для всех тел добавочной скорости, т. е. при рассмотрении соударения с точки зрения движущейся системы отсчета, то из этого требования, как показал Гюйгенс, вытекает закон сохранения импульса.

Показать это можно следующим образом. Обозначим массы соударяющихся тел через $m_i (i = 1, 2, 3, \ldots)$, их скорости до удара

через $\mathbf{u}_i$ и скорости после удара через $\mathbf{U}_i$. Закон сохранения энергии гласит:

$$\frac{1}{2}\sum_i m_i u_i^2 = \frac{1}{2}\sum_i m_i U_i^2. \qquad (1)$$

Сообщим теперь всей системе добавочную скорость $\mathbf{v}$, или, что то же самое, будем рассматривать эту систему по отношению к координатам, движущимся со скоростью $\mathbf{v}$. Тогда скорости тел до и после удара будут, соответственно, равны $\mathbf{u}_i + \mathbf{v}$ и $\mathbf{U}_i + \mathbf{v}$ и сохранение энергии выразится уравнением:

$$\frac{1}{2}\sum_i m_i (\mathbf{u}_i + \mathbf{v})^2 = \frac{1}{2}\sum_i m_i (\mathbf{U}_i + \mathbf{v})^2.$$

Таким образом, получим:

$$\frac{1}{2}\sum_i m_i (u_i^2 + 2\mathbf{v}\mathbf{u}_i + v^2) = \frac{1}{2}\sum_i m_i (U_i^2 + 2\mathbf{v}\mathbf{U}_i + v^2),$$

или, на основании равенства (1),

$$\sum_i m_i \mathbf{v}\mathbf{u}_i = \sum_i m_i \mathbf{v}\mathbf{U}_i,$$

т. е.

$$\mathbf{v}\sum_i m_i \mathbf{u}_i = \mathbf{v}\sum_i m_i \mathbf{U}_i.$$

Это равенство может иметь место при произвольной скорости $\mathbf{v}$ только в том случае, если

$$\sum_i m_i \mathbf{u}_i = \sum_i m_i \mathbf{U}_i. \qquad (2)$$

Последнее уравнение выражает собой закон сохранения импульсов.

Таким образом, из требования, чтобы закон сохранения энергии был справедлив в любой равномерно движущейся системе отсчета, вытекает закон сохранения импульса.

Эти рассуждения подробно и изящно проведены Гюйгенсом в указанной его работе; на приложенном к ней рисунке движущийся наблюдатель изображен в виде человека, плывущего в челноке по реке. Рассуждение Гюйгенса, связывающее между собой два закона сохранения — сохранение энергии и сохранение импульса, может быть существенно обобщено. Мы можем не исходить из определенной формы зависимости энергии от скорости, а вывести эту зависимость из требований весьма общего характера.

Примем произвольную зависимость энергии тела E от его скорости $\mathbf{u}$:

$$E = mf(\mathbf{u}),$$

где m — масса тела; $f(\mathbf{u})$ — произвольная функция. Так как пространство изотропно, а энергия есть величина ненаправленная, то E может зависеть только от абсолютного значения скорости u, но не от значения отдельных ее компонентов:

$$E = mf(u)$$

Аналогичным образом допустим, что количество движения, или импульс тела $\mathbf{p}$, пропорционален его массе и направлен по его скорости $\mathbf{u}$, по абсолютной же величине выражается произвольной функцией скорости $\mathbf{p} = m\mathbf{u}g(u)$. При таких предположениях законы сохранения энергии и импульса выразятся следующим образом:

$$\sum_i m_i f(u_i) = \sum_i m_i f(U_i), \tag{3}$$

$$\sum_i m_i \mathbf{u}_i g(u_i) = \sum_i m_i \mathbf{U}_i g(U_i). \tag{4}$$

Потребуем теперь, чтобы законы сохранения были справедливы и в любой равномерно движущейся системе отсчета, т. е. чтобы равенства (3) и (4) оставались справедливыми и при замене $\mathbf{u}_i$ на $\mathbf{u}_i + \mathbf{v}$, и $\mathbf{U}_i$ на $\mathbf{U}_i + \mathbf{v}$, где $\mathbf{v}$ — произвольный вектор.

Это требование не может быть удовлетворено при произвольном виде функций $f(u)$ и $g(u)$, ибо оно ведет, вообще говоря, к целому ряду несовместимых между собой соотношений. В этом легко убедиться, если, например, положить $f(u) = u^4$. Вообще указанное требование приводит к соотношениям типа:

$$\sum_i m_i u_{ix}^2 F(u_i^2) = \sum_i m_i U_{ix}^2 F(U_i^2),$$

носящим тензорный характер и не могущим быть следствием скалярного и векторного соотношений (3) и (4).

Несложное вычисление, которое мы здесь опускаем,* приводит к следующему результату: единственная форма зависимости энергии и импульса от скорости, при которой законы сохранения остаются справедливыми в движущихся системах отсчета, совпадает с обычными определениями этих понятий:

$$f(u) = \text{const}\, u^2,\ E = \text{const}\, u^2,$$
$$g(U) = \text{const},\ \mathbf{p} = \text{const}\, \mathbf{u}.$$

Этот вывод несколько более общий, чем рассуждения Гюйгенса, в основу которых положено определенное предположение о форме зависимости энергии от скорости.

* См. прим. 1 в конце лекции.

Я позволил себе так подробно остановиться на этом вопросе потому, что приведенные рассуждения можно перенести в теорию относительности. Единственное необходимое при этом изменение заключается в том, что классический закон сложения скоростей должен быть заменен соответствующим релятивистским законом сложения. Сложение двух параллельных скоростей u и v приводит к результирующей скорости u', которая, согласно теории относительности, равна не $u + v$, а $u' = (u + v)/[1 + uv/c^2]$, где c означает скорость света. В том случае, если скорости не параллельны, формула сложения приобретает несколько более сложный характер; однако при любом направлении скоростей справедлива следующая зависимость:

$$\sqrt{1 - \frac{u'^2}{c^2}} = \frac{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{uv\cos(\mathbf{u}, \mathbf{v})}{c^2}}. \tag{5}$$

Если в предшествующих рассуждениях изменить только этот кинематический закон сложения скоростей, то мы однозначно приходим * к следующей зависимости энергии и импульса от скорости:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad \mathbf{p} = \frac{m\mathbf{u}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}; \tag{6}$$

в этих выражениях мы лишь определенным образом распорядились произвольной аддитивной постоянной.

Эти и только эти выражения для E и $\mathbf{p}$ удовлетворяют требованию, чтобы законы сохранения оставались справедливыми в движущихся системах отсчета. Приведенный вывод релятивистских выражений для энергии и импульса аналогичен выводу, данному Ланжевеном, но несколько отличается от него по своей форме.

Отметим, наконец, что теория относительности связывает воедино как самые понятия энергии и импульса, так и законы их сохранения. Подобно тому, как совокупность трех пространственных координат x, y, z и времени t с точки зрения четырехмерной интерпретации теории относительности представляется четырехмерными координатами пространственно-временной точки, так и три слагающих вектора импульса $\mathbf{p}$ и скаляр — энергия E связываются теорией относительности в единый четырехмерный вектор энергии—импульса. Вместе с тем и оба закона сохранения энергии и импульса оказываются неразрывно связанными между собой составными частями единого закона сохранения.

Я хочу теперь перейти ко второй части своего доклада и обратиться к другому способу рассмотрения физических проблем,

* См. прим. 2 в конце лекции.

развившемуся в прошлом столетии и приобретшему весьма большое значение, а именно к физике поля.

В то время как в XVIII столетии в основном господствовала физика частиц, в XIX столетии, особенно во второй его половине, чрезвычайно большое значение приобрела физика поля, под которой нужно понимать описание физических явлений с помощью непрерывных функций пространства и времени. Представления физики поля находятся в известном противоречии с физикой материальной точки. И действительно, понятие частицы всегда в сущности оставалось чуждым физике поля. Все же необходимо пользоваться обоими понятиями: и частицы, и поля, как это особенно ясно видно из волновой механики, по поводу которой я в дальнейшем сделаю несколько замечаний.

Самым замечательным и известным образцом физики поля является максвелловская теория электричества. В этой теории электромагнитное поле описывается двумя векторами **E** и **H**. Вектор **E** (вектор напряженности электрического поля) нельзя, конечно, путать с энергией E, которую мы обозначаем тою же буквой, но обычным шрифтом. Вектор **H** обозначает напряженность магнитного поля. Обе эти величины рассматриваются в теории относительности совместно и в четырехмерном ее изложении объединяются в некоторую единую величину — в четырехмерный тензор поля (**H**, **E**), подобно тому, как энергия E и импульс частицы **p** объединяются теорией относительности в единый четырехмерный вектор энергии и импульса (**p**, E).

Величины **H** и **E** удовлетворяют известной системе максвелловских уравнений:

$$\operatorname{rot}\mathbf{H}-\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}=\frac{4\pi}{c}\mathbf{j},\quad \operatorname{rot}\mathbf{E}+\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t}=0,$$

$$\operatorname{div}\mathbf{E}=4\pi\varrho,\qquad \operatorname{div}\mathbf{H}=0,$$

где ϱ означает плотность электрических зарядов; **j** — плотность электрических токов. Впрочем, мне нет необходимости входить в детали этих уравнений. Я хотел бы обратить внимание только на один определенный вопрос, а именно — на известный закон сохранения электрического заряда, согласно которому алгебраическая сумма Σe электрических зарядов остается постоянной при всех физических явлениях. Этот закон, наряду с законами сохранения энергии и импульса, является одним из самых общих законов физики.

Весьма примечательно, что закон сохранения электричества может быть выведен исходя из одних лишь уравнений Максвелла. Согласно этим уравнениям, общий заряд e, находящийся внутри какого-либо объема V: $e=\int\limits_V \varrho dV$, может быть выражен также в виде потока электрического вектора **E** через поверхность S, ограничивающую этот объем:

$$e=\frac{1}{4\pi}\oint\limits_S E_n dS. \tag{7}$$

Я могу рассматривать уравнение (7) как определение заряда, находящегося внутри объема V. Тогда, если только уравнения Максвелла справедливы на поверхности S объема V, я могу узнать, изменяется ли заряд e внутри этого объема при произвольных происходящих в нем процессах, причем безразлично, остаются ли уравнения Максвелла справедливыми внутри объема V.

Действительно, из уравнения (7) и из уравнений Максвелла в применении к поверхности S следует, что изменение заряда объема равно:

$$\frac{de}{dt}=-\oint\limits_S j_n dS. \tag{8}$$

Если нормальная слагающая плотности тока j_n на поверхности равна нулю, то $de/dt=0$ и заряд постоянен. Всегда можно выбрать поверхность S настолько удаленной, чтобы плотность тока на ней исчезала, и тогда сохранение заряда в ограниченном ею объеме j_n будет доказано вне всякой зависимости от того, применимы ли уравнения Максвелла к процессам, происходящим во внутренней части этого объема. Приведенное доказательство сохранения электричества является идеальным примером того, как законы сохранения могут быть выведены в качестве следствий из теории поля.

С законом сохранения энергии в максвелловской теории дело обстоит иначе: его нельзя вывести из одних только максвелловских уравнений. Чтобы его доказать, помимо уравнения Максвелла, нужно знать еще закон движения электрических зарядов, например уравнение движения зарядов под влиянием лоренцевой силы.

Закон движения зарядов является некоторым новым положением, не вытекающим из максвелловских уравнений. Это явствует, например, из того, что, как известно, уравнения Максвелла имеют решение для случая двух электрических зарядов, находящихся друг от друга на заданном расстоянии. Из одних только уравнений Максвелла нельзя судить, будут ли эти заряды вечно покоиться или же начнут двигаться под влиянием взаимного притяжения или отталкивания. Чтобы ответить на этот вопрос, нужно знать закон движения зарядов или присоединить к уравнениям Максвелла какой-либо вариационный принцип, что равносильно введению в неявной форме определенного закона движения.

Иначе обстоит дело в общей теории относительности. Там оказывается возможным вывести закон сохранения энергии и импульса из основных уравнений теории без каких-либо добавочных допущений. Вывод этот аналогичен выводу закона сохранения электричества из уравнений Максвелла.

Дело обстоит следующим образом: подобно тому как в теории Максвелла электромагнитное поле описывается двумя векторами **E** и **H**, имеющими шесть компонентов, так в общей теории относительности поле тяготения описывается компонентами неко-

торого потенциала $g_{\mu\nu}$ ($\mu, \nu = 1, 2, 3, 4$). Компоненты эти симметричны в индексах μ и ν: $g_{\mu\nu} = g_{\theta\mu}$ так что число независимых компонентов равно десяти. Подобно тому как **E** и **H** подчиняются дифференциальным уравнениям Максвелла, так и $g_{\mu\theta}$ удовлетворяют некоторой довольно сложной системе дифференциальных уравнений второго порядка. Эти уравнения могут быть сокращенно записаны следующим образом:

$$G_{\mu\upsilon} = -kT_{\mu\upsilon}, \tag{9}$$

где $G_{\mu\upsilon}$ — некоторые зависящие от $g_{\mu\upsilon}$ дифференциальные выражения второго порядка; $T_{\mu\upsilon}$ — компоненты так называемого тензора энергии-импульса, характеризующего пространственное распределение энергии и импульса.

В частности, объемный интеграл

$$\int_V T_{44} dV = E \tag{10}$$

равен энергии, содержащейся внутри объема интегрирования V, а объемные интегралы

$$\int_V T_{4k} dV = p_k \quad (k = 1, 2, 3) \tag{11}$$

равны компонентам полного импульса, содержащегося внутри V. Впрочем, в этих уравнениях я опустил для простоты тривиальные множители вроде -1 или c.

Компоненты тензора $T_{\mu\upsilon}$ играют в уравнениях поля тяготения такую же роль, какую в уравнениях Максвелла играют плотности электрических зарядов и токов.

Законы сохранения энергии и импульса получаются из уравнений (9) поля тяготения совершенно так же, как закон сохранения электричества получается из уравнений электромагнитного поля. Подобно тому, как изменение во времени заряда e, находящегося в объеме V, может быть выражено через интеграл (8), взятый по поверхности S этого объема V, так и изменения во времени энергии и импульса (10) и (11) объема V могут быть выражены через интегралы, взятые по его поверхности S. Если поверхность эта достаточно удалена, то соответствующие поверхностные интегралы обращаются в нуль, откуда следует сохранение энергии и импульса для объема V.

Весьма существенно, что для этого доказательства достаточно, чтобы уравнения теории относительности были справедливы на поверхности S этого объема; если это имеет место, то сохранение полной энергии и импульса объема V доказывается вне зависимости от того, применимы ли уравнения теории к внутренней части V. Эти выводы принадлежат Эйнштейну и представляют собой существенное достижение.

Аналогию между теорией электричества и теорией тяготения можно продолжить и дальше. Задачей так называемой единой теории поля, построением которой занимались как сам Эйнштейн,

так и другие авторы, является охват в единой системе законов и электричества, и тяготения. В основе этих попыток лежит стремление к синтезу всех трех законов сохранения: сохранения энергии, сохранения импульса и сохранения заряда.

Я не буду подробно рассматривать эти вопросы, скажу только, что работами ряда физиков, в том числе ленинградского физика Манделя, была доказана возможность построения такой единой теории. Путем введения, помимо пространственных координат x, y, z и времени t, еще некоторой дополнительной пятой координаты или же, что более удовлетворительно, путем перехода от x, y, z, t к пяти соответствующим однородным координатам можно построить единую теорию электричества и тяготения, в которой, в частности, все пять уравнений, выражающих собой законы сохранения (энергия, три компонента импульса и заряд), формально выражаются одним единым уравнением.

Заканчивая эту часть своей лекции, я хотел бы еще раз подчеркнуть аналогию между тремя основными законами сохранения энергии, импульса и электрического заряда, аналогию, имеющую, по моему мнению, глубокое значение.

Перехожу теперь к гораздо более трудным вопросам, касающимся законов сохранения в квантовой теории и поведшим в последнее время к очень оживленным спорам.

Сомнения в применимости законов сохранения к атомарным явлениям возникли почти одновременно с возникновением квантовой теории в связи с трудностями, встретившимися при попытках квантового объяснения различных явлений интерференции. В 1923 г. Бор и Слэтер сделали попытку разрешить эти затруднения на основе статистического истолкования законов сохранения, т. е. на основе допущения, согласно которому энергия сохраняется лишь в среднем за большое число случаев, но что в каждом отдельном акте закон сохранения может нарушаться. Однако эта попытка оказалась несостоятельной.

Во-первых, если закон сохранения несправедлив, то вообще весьма трудно понять, почему бы ему в этом случае все же выполняться в среднем статистическом.

Во-вторых, несостоятельность статистической интерпретации законов сохранения выявилась и эмпирически. Известно, что при рассеянии рентгеновских лучей наблюдается явление Комптона. Оно состоит в том, что рентгеновский (световой) квант $h\upsilon$ (υ — частота света или рентгеновских лучей; h — квантовая постоянная Планка), соударяясь с электроном, отклоняется в сторону под некоторым углом φ к направлению первоначального полета, причем его частота υ уменьшается. С другой стороны, электрон, испытавший соударение с квантом, приобретает определенную кинетическую энергию и отлетает в сторону под некоторым углом Θ к направлению первоначального полета кванта. Теория этого явления Комптона непосредственно вытекает из законов сохранения энергии и импульса. Таким образом, применимость этих законов к индивидуальным атомарным актам может быть проверена на опыте. Правда, полет отклоненного кванта нельзя реги-

стрировать непосредственно, но его можно обнаружить по вторичным электронам, выбиваемым этим квантом на своем пути.

Измерения показали, что явление Комптона протекает в полном согласии с законами сохранения. В частности, оказалось, что соотношение между углами φ и Θ отклонения кванта и электрона соответствуют законам сохранения. Кроме того, Боте и Гейгер доказали так называемым методом совпадений, что отброс электрона и отклонение кванта действительно происходят одновременно.

Правда, в самое последнее время, года полтора—два тому назад, в связи с опытами Шенкланда возникли сомнения в правильности этих эмпирических результатов. Однако они скоро были устранены работами целого ряда физиков, так что возникновение этих сомнений повело только к более строгому экспериментальному обоснованию применимости законов сохранения.

Сам Бор в последнее время совершенно определенно указал на то, что современное положение физики не дает ни возможности, ни оснований к возрождению старых попыток 1923 г. статистического истолкования законов сохранения. Наоборот, очевидно, законы сохранения вполне применимы к атомарным явлениям, и все возникающие в этой области трудности могут быть устранены не путем отказа от этих законов, а на основе боровского принципа дополнительности.

Важнейшим частным случаем этого принципа дополнительности является известное соотношение неопределенности Гейзенберга $\Delta x \Delta p \geqslant h$, связывающее между собой неопределенность в положении частицы Δx с неопределенностью ее импульса Δp. Совершенно аналогично и другое соотношение Гейзенберга: $\Delta E \Delta t \geqslant h$, связывающее длительность Δt процесса измерения энергии частицы с неопределенностью этой энергии ΔE. По терминологии Бора, понятия положения и импульса, так же как понятия времени и энергии, являются понятиями взаимно дополнительными.

Для изложения этих сложных и важных вопросов понадобился бы специальный доклад. Поэтому, не вдаваясь в подробности, скажу только, что современная квантовая механика полностью оправдывается во всей области атомной физики (я не включаю в это понятие физику ядра). Эта теория удовлетворяет как логическим, так и эмпирическим требованиям, которые мы должны предъявлять ко всякой физической теории. Логические требования сводятся к тому, чтобы, во-первых, теория была лишена внутренних противоречий и, во-вторых, чтобы она основывалась на возможно меньшем числе исходных допущений и предпосылок. Что касается эмпирических требований, то они заключаются в том, чтобы теория правильно, в согласии с экспериментом, передавала бы физические явления, относящиеся к определенной области ее применимости.

Квантовая теория удовлетворяет всем этим требованиям, и поэтому ее нужно принять и признать вполне обоснованной, а не подходить к ней с какими бы то ни было предвзятыми требо-

ваниями. В этом отношении позицию небольшого числа немецких физиков старшего поколения, которые возражают против теории относительности и против квантовой теории, никак нельзя считать правильной.

Вообще нужно относиться с большой осторожностью к попыткам некоторых философов давать предписания физической теории. Наоборот, философия должна свою систему понятий строить в соответствии с опытными фактами. Итак, поскольку квантовая теория удовлетворяет всем требованиям, которые нужно предъявлять к физической теории, мы должны считать ее вполне обоснованной и достоверной.

Возвращаемся к исходному вопросу. Как уже отмечалось, законы сохранения остаются справедливыми и в квантовой теории. Нужно только иметь в виду, что опытная проверка закона сохранения энергии не может быть произведена в точно определенный момент времени, а проверка сохранения импульса связана с внесением неопределенности в положение системы. Наоборот, измерение, например, положения системы вносит неопределенность в величину ее импульса, ибо при этом измерении системе передается измерительными приборами некоторое неконтролируемое количество импульса.

Переходя к вопросам физики атомного ядра, нужно прежде всего отметить, что здесь мы вступаем в совсем новую область, успешное проникновение в которую относится лишь к самому последнему времени. Затруднения с применением закона сохранения энергии к этой области возникли уже давно в связи с явлениями бета-радиоактивности. При бета-распаде из радиоактивного ядра, как известно, вылетает электрон большой скорости. Затруднения связаны с тем, что каждое бета-радиоактивное вещество испускает электроны не одной какой-либо определенной энергии, а электроны самых разнообразных энергий (сплошной энергетический спектр). Между тем бета-распад протекает по такому же чисто вероятностному закону (экспоненциальная зависимость от времени), как и альфа-распад, при котором из ядра выбрасываются альфа-частицы вполне определенной энергии. Далее, новое ядро, образовавшееся в результате бета-распада, находится в точно определенном состоянии, характеризующемся вполне определенной массой, и, если оно альфа-радиоактивно, излучает альфа-частицы вполне определенной энергии. Поэтому трудно понять, почему бета-электроны не обладают вполне определенной энергией.

В связи с этим совсем недавно высказывалось даже сомнение в том, являются ли бета-частицы действительно электронами одной и вполне определенной массы. Впрочем, по-видимому, эти сомнения можно считать устаревшими.

Разброс бета-электронов по энергиям пытались связать с квантово-механическим соотношением неопределенности:

$$\Delta E \Delta t \geqslant h.$$

Однако эта попытка несостоятельна. При измерении энергии бета-электронов мы не пытаемся следить за деталями процесса распада, и единственное ограничение длительности измерения связано с длительностью жизни τ радиоактивного ядра. Эта длительность τ чрезвычайно велика относительно атомарных масштабов времени и практически не может внести никакой неопределенности в значение энергии.

Наконец, многократно высказывалось предположение, что бета-распад происходит с нарушением закона сохранения энергии. Я лично возражал против этого предположения. Во-первых, я считаю, что аналогия между законами сохранения энергии и сохранения электрического заряда имеет глубокое значение и может являться надежной руководящей нитью. Вряд ли можно, отказываясь от сохранения энергии, сохранить закон сохранения электричества, а этот последний закон никогда еще не приводил ни к каким затруднениям. Поэтому я с самого начала отказывался верить в нарушение сохранения энергии.

Далее, необходимо иметь в виду те основанные на общей теории относительности соображения, о которых шла речь во второй части лекции. Мы видели, что, совершенно не вдаваясь в рассмотрение процессов, происходящих во внутренней части какого-либо объема, и исходя только из применимости теории относительности к процессам, происходящим на поверхности этого объема, можно доказать сохранение энергии, находящейся внутри объема. Поэтому специфические особенности ядерных процессов не могут изменить этого вывода.

В дальнейшем эти соображения принципиального характера были подтверждены и данными эксперимента. Эллис и Мотт выяснили существенное значение границы энергетического спектра бета-электронов, т. е. максимальной энергии, с которой электрон может вылетать из ядра. Если принять, что в каждом акте бета-распада ядро теряет именно эту максимальную энергию, то закон сохранения энергии очень хорошо оправдывается на опыте. Эллис и Мотт доказали это, сравнив сумму выделившихся энергий для различных путей распада в местах разветвления радиоактивных семейств.

Все это привело меня к гипотезе, согласно которой в каждом акте бета-распада из ядра одновременно с электроном вылетает еще некоторая другая частица, уносящая с собой разницу между энергией, теряемой ядром, и энергией бета-электрона. Частица эта должна обладать чрезвычайно большой проникающей способностью. Этим объяснялось бы то, что она пока не была обнаружена на опыте. В связи с этим электрический заряд ее должен равняться нулю. Далее, необходимо допустить, что, подобно электрону, она обладает внутренним моментом количества движения (спином), равным $^1/_2 h$. Что же касается ее массы, то она, безусловно, должна быть гораздо меньше массы протона и, вероятно, не должна превышать массу электрона. Вероятнее всего, что ее масса покоя, подобно массе покоя светового кванта, равна нулю, так что

она движется со скоростью света; впрочем, не исключена возможность, что эта частица обладает массой, сравнимой с массой электрона.

Эта гипотеза была впервые изложена мной в 1931 г. в лекциях, которые я читал тогда в Калифорнийском университете. Однако опубликовать ее в печати я тогда не решился.*

Впоследствии Ферми, основываясь на этой гипотезе, развил теорию бета-распада и дал даже гипотетической частице ставшее общепринятым название «нейтрино», что по-итальянски означает «маленький нейтрон».

Как приведенные выше соображения, так и ряд других фактов говорят в пользу существования нейтрино, хотя надо признать неудовлетворительным тот факт, что пока еще не удалось обнаружить нейтрино непосредственно на опыте. По вопросу об имеющихся в этом отношении перспективах мнения расходятся. В частности, Гейзенберг в прошлом году выдвинул гипотезу о природе так называемых ливней космических лучей. Согласно этой гипотезе, в космических ливнях должны присутствовать нейтрино столь большой энергии, что их при известных условиях можно было бы обнаружить современными измерительными методами. Однако вопрос о правильности гипотезы Гейзенберга остается открытым и может быть решен только в процессе дальнейшего изучения проблемы. Во всяком случае изучение космических лучей обещает дать очень много нового, в частности, и по вопросу о нейтрино.

На этом позвольте мне закончить лекцию, в которой я постарался дать краткий очерк эволюции законов сохранения в течение длительного периода развития физики.

Примечание 1 (к с. 220). Даны уравнения сохранения энергии и импульса:

$$\sum_i m_i f(u_i'^2) = \sum_i m_i f(U_i'^2), \tag{П.1}$$

и

$$\sum_i m_i f(u_i^2) = \sum_i m_i f(U_i^2) \tag{П.2}$$

где функции f и g пока произвольны.

Накладываем требование, чтобы законы сохранения оставались справедливыми и в движущихся системах отсчета, т. е. при замене $\mathbf{u}_i$ на $\mathbf{u}_i' = \mathbf{u}_i + \mathbf{v}$ и $\mathbf{U}_i$ на $\mathbf{U}_i' = \mathbf{U}_i + \mathbf{v}$:

$$\sum_i m_i \mathbf{u}_i g(u_i^2) = \sum_i m_i \mathbf{U}_i g(U_i^2), \tag{П. 3}$$

$$\sum_i m_i \mathbf{u}_i' g(u_i'^2) = \sum_i m_i \mathbf{U}_i' g(U_i'^2). \tag{П. 4}$$

---

* Гипотеза Паули была впервые изложена в печати с его разрешения в работе двух участников его семинара Карлсона и Оппенгеймера в 1932 г. (*Прим. перев.*).

Разлагаем $f(u_i'^2)$ в ряд Тэйлора:

$$f(u_i'^2) = f(u_i^2 + 2\mathbf{u}_i\mathbf{v} + v^2) = f(u_i^2) + (2\mathbf{v}\mathbf{u}_i + v^2) f'(u_i^2) + \\ + \frac{1}{2}(2\mathbf{v}\mathbf{u}_i + v^2)^2 f''(u_i^2) + \ldots,$$

где f', f'' и т. д. — производные функции $f(u_i^2)$. Ограничиваясь степенями v не старше, чем v^2, получаем:

$$f(u_i'^2) = f(u_i^2) + 2\mathbf{v}\mathbf{u}_i f'(u_i^2) + \{v^2 f'(u_i^2) + 2(\mathbf{v}\mathbf{u}_i)^2\} f''(u_i^2).$$

Внеся это разложение в (П. 3) и приравняв коэффициенты при каждой степени v, получим, во-первых, вновь уравнение (П. 1) и, кроме того:

$$\sum_i m_i \mathbf{u}_i f'(u_i^2) = \sum_i m_i \mathbf{U}_i f'(U_i^2),$$

$$\sum_i m_i [f'(u_i^2) + 2u_i^2 \cos^2(\mathbf{v}, \mathbf{u}_i) f''(u_i^2)] = \sum_i m_i [f'(U_i^2) + 2U_i^2 \cos^2(\mathbf{v}, \mathbf{U}_i) f'(U_i^2)].$$

Первое из этих уравнений выполняется на основании (П. 2) в том и только в том случае, если

$$f'(u^2) = \text{const}\, g(u_i^2),$$

второе же уравнение выполняется лишь при условии $f'(u_i^2) = \text{const}$ и $f''(u_i^2) = 0$. Стало быть,

$$f = au^2 + c;\ g = b,$$

где a, b и c — произвольные постоянные.

Легко убедиться, что при этом выборе функций f и g законы сохранения оказываются точно справедливыми в движущейся системе отсчета (а не только вплоть до членов порядка v^2). Требуя, чтобы кинетическая энергия обращалась в нуль при $u = 0$, мы должны положить $c = 0$ и получим: $E = amu^2$, $p = bmu$, так что от выбора постоянных a и b зависят лишь единицы измерения энергии и импульса.

Примечание 2 (к с. 221). В теории относительности произвольные функции f и g в уравнениях (П. 1) и (П. 2) удобно считать функциями не квадрата скорости u^2, а функциями связанной с ними величины k:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}.$$

При переходе к движущейся системе координат получаем на основании релятивистской теоремы сложения скоростей:

$$k' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u'^2}{c^2}}} = \frac{1 + \frac{\mathbf{u}\mathbf{v}}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = k\frac{1 + \frac{\mathbf{u}\mathbf{v}}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

или, ограничиваясь членами не старшими, чем v^2/c^2,

$$k' = k + k\left(\frac{\mathbf{u}\mathbf{v}}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2}\right).$$

Стало быть,

$$f(k') = f(k) + \frac{k}{c^2}\left(\mathbf{u}\mathbf{v} + \frac{v^2}{2}\right) f'(k) + \frac{k^2}{2c^4}\left(\mathbf{u}\mathbf{v} + \frac{v^2}{2}\right)^2 f''(k) + \ldots$$

или, вплоть до квадрата отношения v/c,

$$f(k') = f(k) + \mathbf{v}\mathbf{u}\frac{k}{c^2} f'(k) + \frac{v^2 k}{2c^2}\left[f'(k) + \frac{u^2 k}{c^2}\cos^2(\mathbf{u}, \mathbf{v}) f'(k)\right].$$

Внеся это разложение в выражение закона сохранения энергии в движущейся системе отсчета

$$\sum_i m_i f(k_i') = \sum_i m_i f(K_i')$$

и приравняв коэффициенты при каждой степени v, получим:

$$\sum_i m_i f(k_i) = \sum_i m_i f(K_i),$$

$$\sum_i m_i \mathbf{u}_i k_i f'(k_i) = \sum_i m_i \mathbf{U}_i K_i f'(K_i),$$

$$\sum_i m_i k_i \left\{f'(k_i) + \frac{u_i^2}{c^2} k_i \cos^2(\mathbf{u}_i, \mathbf{v}) f''(k_i)\right\} =$$

$$= \sum_i m_i K_i \left\{f'(K_i) + \frac{U_i^2}{c^2} K_i \cos^2(\mathbf{U}_i, \mathbf{v}) f''(K_i)\right\}.$$

Первое из этих уравнений совпадает с (П. 1), второе — выполняется на основании (П. 2) в том и только в том случае, если

$$kf'(k) = \text{const}\, g(k).$$

Что же касается третьего уравнения, то оно распадается на два уравнения — одно тензорное:

$$\sum_i m_i k_i^2 u_i^2 \cos^2(\mathbf{u}_i, \mathbf{v}) f''(k_i) = \sum_i m_i K_i^2 U_i^2 \cos(\mathbf{U}_i, \mathbf{v}) f''(K_i)$$

и одно скалярное:

$$\sum_i m_i k_i f'(k_i) = \sum_i m_i K_i f'(K_i).$$

Тензорное уравнение может удовлетвориться только при условии $f''(k) = 0$, скалярное же удовлетворяется на основании (П. 1),

если $kf'(k) = \text{const}\, f(k)$. Совокупность этих соотношений приводит к результату:

$$f = ak \quad \text{и} \quad g = bk,$$

где a и b — произвольные постоянные.

Отметим, что в отличие от нерелятивистского случая в выражение для f, а вместе с тем и для энергии E аддитивная постоянная не входит.

Легко убедиться, что при этом выборе функций f и g законы сохранения оказываются точно справедливыми в движущейся системе отсчета (а не только вплоть до членов порядка v^2/c^2). Стало быть,

$$E = amk = \frac{am}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}, \quad \mathbf{p} = bmuk = \frac{bm\mathbf{u}}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}.$$

В. Я. Френкель

К РАННЕЙ ИСТОРИИ НЕЙТРИНО

В качестве приложения к публикации статьи Вольфганга Паули (1900—1958) представляется уместным рассказать о его контактах с физиками нашей страны. Видимо, первым из них был Я. И. Френкель. Осенью 1925 г. он был командирован в качестве рокфеллеровского стипендиата в Германию. Представление к стипендии было сделано Паулем Эренфестом, преемником Лоренца по кафедре теоретической физики Лейденского университета, большим другом советской науки. В переписке Эренфеста с А. Ф. Иоффе имя Паули неоднократно упоминается, в частности, в связи с намечавшейся поездкой Френкеля за границу. Эренфест, критический талант которого среди современников ценился чрезвычайно высоко, в свою очередь рано распознал и подчеркивал в письмах к А. Ф. Иоффе необычайно острый ум Паули-критика. Он писал о 24-летнем Паули, что «он одновременно и находчив и четко мыслит» [1, с. 178].

В 1925 г. Паули был доцентом Гамбургского университета, в котором тогда работали, среди прочих, теоретик Г. Вентцель и О. Штерн, известный не только своими классическими экспериментальными исследованиями, но и тонкими работами по термодинамике и квантовой теории. «Физическая» осень 1925 г. была богата результатами напряженной работы теоретиков: завершилось построение основ квантовой механики. Примечательным событием было и высказанное как раз в это время учениками Эренфеста Гаудсмитом и Уленбеком представление о вращающемся электроне. В разработке идеи, помимо ее авторов и Эренфеста, приняли участие многие физики, в том числе и ее корифеи — Лоренц и Эйнштейн. Паули, как известно, поначалу относился

к идее о спине электрона (сыгравшем потом кардинальную роль в его собственных работах по принципу запрета и построению теории парамагнетизма электронного газа) отрицательно. Отрицательным было и его отношение к соответствующим работам,* начатым в этом направлении в Гамбурге Я. И. Френкелем и успешно завершенным полугодом позднее, уже в Геттингене. Однако в целом общение с Паули (и Штерном) имело большое значение для Я. И. Френкеля, о чем он неоднократно вспоминал.

Много взаимодействовал Паули и с В. А. Фоком, рокфеллеровским стипендиатом 1928 г., во время командировки его в Германию. Паули проявлял живой интерес к его работам. Имя Фока — и только его одного из советских физиков — фигурирует в опубликованной переписке Паули (в его письмах Эйнштейну и Эренфесту) в связи с работами Фока по релятивистской квантовой механике [5, с. 523—526].

Другим советским физиком-теоретиком, контактировавшим с Паули и испытавшим на себе его сильное влияние, был Л. Д. Ландау, общавшийся с ним в 1929—1931 гг. в Цюрихе. Это Ландау специально отмечал в своем отчете о командировке (от 21 мая 1931 г.): «С октября 1929 г. до апреля 1930 г. я находился в заграничной командировке за счет НКП, а затем до марта 1931 г. по рокфеллеровской стипендии. За это время я имел возможность работать в контакте с наиболее выдающимися современными теоретиками, из которых наибольшее влияние на мою работу оказали N. Bohr (Копенгаген), W. Pauli (Цюрих) и W. Heisenberg (Лейпциг)» [6, л. 4]. Ю. Б. Румер пишет: «Встреча с Паули произвела на Ландау огромное впечатление» [7, с. 101] и отмечает большую роль, которую тот сыграл в формировании стиля мышления Ландау-теоретика.

К началу 20-х годов Паули получил мировую известность благодаря классическому обзору по теории относительности, высоко оцененному Эйнштейном и многими другими выдающимися физиками, исследованиям по квантовой механике и электродинамике и их приложениям к конкретным физическим проблемам и задачам.

Когда в нашей стране началась подготовка к очередному съезду физиков (это был 7-й физический съезд с начала революции и первый Всесоюзный физический съезд **), Паули, В. Боте, А. Зоммерфельд, Р. Пайерлс, К. Рамзауэр и Ф. Симон были приглашены принять в нем участие. Съезд проходил 19—24 августа 1930 г. в Одессе и сыграл большую роль в дальнейшем развитии советской физики, планировании научных исследований, выделении и укреплении физических центров в разных городах страны и ее республиках.

---

* Перипетии этих отношений отражены в письмах Я. И. Френкеля на родину [2, с. 169; 3, с. 463; 4].

** Первые шесть съездов назывались «Съездами русских физиков»; начиная с 4-го (Ленинград, 1924 г.) к участию в них привлекались зарубежные ученые.

16 Заказ 1006

С докладами на съезде выступили представители московской школы нелинейных колебаний (А. А. Андронов, А. А. Витт, Н. Д. Папалекси, С. Э. Хайкин), ленинградской физической школы (В. Р. Бурсиан, Г. А. Гринберг, В. Н. Кондратьев, П. И. Лукирский, П. С. Тартаковский), киевские физики (Л. И. Кордыш, В. К. Роше, В. М. Тучкевич, П. В. Шаравский) и др. Специальное заседание съезда было посвящено общим проблемам квантовой механики; докладчиками на нем были В. Паули, И. Е. Тамм и Я. И. Френкель. Паули, как и другие зарубежные гости, имел возможность познакомиться с достижениями советской физики и ее представителями. После насыщенной научной программы участники съезда совершили морское путешествие на теплоходе «Грузия» по Черному морю с заходом в Ялту, Сочи и Батуми. На теплоходе продолжались научные контакты, завязывались деловые и дружеские отношения. Сохранилось много фотографий, относящихся к самому съезду и морской поездке. Некоторые из них спустя более 40 лет опубликовал Р. Пайерлс: Паули, Тамм, Френкель, Симон, живописно расположившись на пляже в Лузановке, под Одессой, что-то живо обсуждают.

К сожалению, текст доклада Паули (и других докладов, читавшихся на съезде) не сохранился — имеется неполный список тезисов докладов [8]. В этом плане нам не удалось оказать содействия исследователям научного наследия Паули из Штуттгартского университета, которые, сопоставив время проведения съезда в Одессе и дату знаменитого письма Паули из Цюриха «радиоактивным дамам и господам» (4 декабря 1930 г.), надеялись найти в этом докладе идеи-предвестники гипотезы о нейтрино.

Известно, что Паули приглашали в СССР на более узкие по тематике и числу участников конференции: по физике твердого тела (Ленинград, 1932 г.), 1-ю Всесоюзную ядерную конференцию (Ленинград, 1933 г.), Конференцию по теоретической физике (Харьков, 1934 г.), в которой принял участие Н. Бор. По тем или иным причинам Паули не сумел тогда приехать в нашу страну.

Однако он приехал на представительную 2-ю Всесоюзную конференцию по атомному ядру, состоявшуюся 20—26 сентября 1937 г. в Москве и выступил на ней с докладом. Конференция собрала около 120 советских физиков, работавших в этой бурно развивавшейся области науки. В Москве было прочитано около 20 докладов. Гостями конференции, также выступившими на ней с сообщениями, были П. Оже (Франция), Д. Вильямс и Р. Пайерлс (Англия). На этот раз доклады были опубликованы. Более того, в традициях такого рода конференций, стенографировалась состоявшаяся по ним дискуссия, так что выступления Паули и других участников собраний в прениях были опубликованы [9]. Доклады касались нескольких проблем: 1) прохождения β-лучей и быстрых электронов через вещество (А. И. Алиханов, Л. В. Грошев и И. М. Франк), 2) эффекта Вавилова-Черенкова (И. Е. Тамм, И. М. Франк и П. А. Черенков), 3) β-лучей (Д. В. Скобельцын), 4) космических лучей (П. Оже, В. И. Векслер, А. Б. Вериго,

Вольфганг Паули, Джемс Франк и Фридрих Пашен. Комо, 1927 г.

С. Н. Вернов), 5) строения ядра и ядерных сил (Л. Д. Ландау, И. Е. Тамм, Я. И. Френкель), 6) физики нейтронов и их взаимодействия с веществом (И. В. Курчатов, А. И. Лейпунский, Л. И. Русинов, И. Я. Померанчук и др.).

Наконец, два доклада были посвящены проблемам β-распада: эксперименту (А. И. Алиханьян) и теории (В. Паули). Паули представил критические соображения, относящиеся к теории β-распада Ферми, обсуждал правомерность использования теории возмущений для описания этого явления и соответствующего разложения решения квантово-механического уравнения в ряд по степеням малого параметра (постоянной Ферми) [10]. Эта критика, насколько можно судить по литературным данным, не получила дальнейшего развития. Сошлемся на Ф. Разетти, утверждавшего в комментарии к основополагающей статье Ферми по теории β-распада, что эта «теория оказалась способной выдержать почти без изменений два с половиной десятилетия революционного развития ядерной физики» [11, с. 522]. Того же мнения придерживается и Б. М. Понтекорво: «Поразительно, но эта теория со сравнительно небольшими, хотя и крайне важными и многочисленными дополнениями, просуществовала почти без изменения вплоть до объединенной теории электрослабых взаимодействий Глэншоу—Вейнберга—Салама» [12, с. 47]. С другой стороны, сам Ферми в своих лекциях, прочитанных в 1950 г., указывал: «Теория β-распада, основанная на гипотезе о существовании нейтрино, достигла некоторых успехов в объяснении общих свойств явления... Но, с другой стороны, до сих пор не найдено вполне удовлетворительной формы этой теории» [13, с. 9].

Из замечаний, которые высказал В. Паули в прениях, обращает на себя внимание его скептическая оценка идей, выдвинутых Брейтом и Кондоном о зарядовой независимости сильных взаимодействий. Он писал, что «предположение о равенстве сил между различными тяжелыми частицами, которое делают американские ученые, является очень упрощенным, а потому неправильным». Мы видим здесь запечатленную на русском языке вариацию сакраментальной оценки Паули: «Das ist entweder falsch oder trivial»,* которую он часто и не всегда справедливо (см. [2, с. 284], а также [14]) высказывал по отношению к разного рода работам своих коллег.

В отчете о 2-й конференции [15] специально указывается, что «кроме докладов на самой конференции, была организована серия обзорных лекций для более широких кругов научных работников, студентов и передовых рабочих».** Вероятно, именно в рамках этой программы и выступил Паули с публикуемой выше лекцией (с. 217). Оригинальной рукописи его выступления не сохранилось. Может быть, впрочем, ее и вообще не было, и Паули прочел лекцию, не опираясь на какой-либо письменный текст. В качестве переводчика Паули выступил И. Е. Тамм. По мнению И. М. Франка, данный перевод выступления Паули мог быть выполнен Таммом на основе записей, сделанных во время доклада кем-либо из его учеников.

Доклад Паули был опубликован в одном из сборников, выпущенных Университетом физико-химии и химической технологии им. акад. Н. Д. Зелинского. Статье Паули в этом сборнике предшествует первая публикация известных воспоминаний акад. П. Л. Капицы о Э. Резерфорде. Среди других авторов сборника — Н. Д. Зелинский и П. А. Ребиндер; часть материалов сборника посвящена проф. А. И. Бачинскому в связи с 25-летием со времени установления им закона вязкости жидкостей.

Уместно теперь представить «летопись нейтрино» и дополнить ее некоторыми новыми сведениями и замечаниями.* Как известно и как уже упоминалось выше, впервые с гипотезой о нейтральной частице, которая своим существованием должна была бы прояснить трудности, возникавшие при объяснении непрерывного спектра β-распада, Паули познакомил своих коллег в Тюбингене (прежде всего Г. Гейгера и Л. Мейтнер) письмом от 4 декабря 1930 г. (текст этого письма он вновь получил от Л. Мейтнер в середине 50-х годов; на русском языке письмо воспроизведено в [16, с. 300 и 17, с. 108, 109]). Гипотетическая частица была названа в письме «нейтроном». Спин этой частицы, по Паули, равен $^1/_2$, масса предполагалась равной массе электрона (или, во всяком случае, не более 0.01 массы протона); считалось, что нейтрон обладает магнитным моментом. В работе [18] анализируется ситуация в физике в целом и в научной (и личной) биографии Паули, которая подвела его к этой гипотезе.**

Перед широкой аудиторией Паули впервые сообщил о частице, уносящей часть энергии при β-распаде, во время своего пребывания в Америке. Произошло это в июне 1931 г. в Пасадене на 171-м заседании Американского физического общества. Секретарь этого заседания проф. Л. Леб назвал его «наиболее успешным изо всех, когда-либо собиравшихся на тихоокеанском побережье» [19, p. 581]. У Леба были основания для такой оценки, поскольку среди участников заседания и докладчиков можно назвать П. Бриджмена, С. Гаудсмита, У. Кулиджа, К. Дэвиссона, Э. Лоуренса (доклад о циклотроне!), Ч. Лауритсена, Р. Оппенгеймера, М. Тьюва, Г. Юри. Среди выступивших гостей из Европы были В. Паули и Р. Фаулер.

---

* Это или ошибочно, или тривиально (нем.).

** То же самое имело место и во время 1-й Всесоюзной ядерной конференции в Ленинграде, где с докладом перед широкой аудиторией в Выборгском доме культуры выступил Ф. Жолио.

* При обсуждении этой части работы большую помощь автору оказал А. П. Гринберг.

** В этой интересной работе дан краткий перечень «предшественников» чэдвиковского нейтрона, открытого в 1932 г. Оказывается, что с гипотезой о существовании нейтральной частицы выступал не только Резерфорд в своей известной бейкерианской лекции в июне 1920 г., но и ранее, в 1909 г., В. Нернст, и позднее, в 1929 г., Р. Фюрт. Паули знал о работе последнего и обсуждал ее с Эренфестом.

На съезд в Пасадену приехал находившийся в то время в США Я. И. Френкель, который писал из Лос-Анжелоса на родину 15 июня 1931 г.: «Я встретил на съезде ряд старых знакомых, в том числе Фаулера и Паули. Последний так же толст, как и в прошлом году (на съезде физиков в Одессе, — *В. Ф.*). Через час он вместе с Гайтлером и еще одним немецким физиком зайдут за мной в гостиницу, чтобы организовать какое-либо совместное увеселение» [2, с. 297].

В рамках съезда в Пасадене были проведены три симпозиума: «Физика кристаллов», «Современное состояние проблемы ядерной структуры» и «Получение заряженных частиц высокой энергии». Рефераты докладов на симпозиумах не помещались в отчетах о съезде, так что известно только название выступления Паули «Проблемы сверхтонкой структуры».

Следующая страничка «нейтринной летописи» — октябрь 1931 г., конференция по ядерной физике в Риме, собравшая весь цвет европейской физики. Именно здесь Ферми в беседах с Паули поддержал идею о гипотетической частице, испускаемой при β-распаде.* Но в трудах римской конференции дискуссии не публиковались, так что своих «следов» нейтрино на их страницах не оставило. Более того, внимание участников было привлечено прежде всего к идее Н. Бора, в которой загадку непрерывного спектра β-распада предлагалось решать за счет отказа от справедливости закона сохранения энергии в микропроцессах. П. Эренфест, принимавший участие в работе римской конференции, в письме к Иоффе ни словом не обмолвился об альтернативном решении проблемы β-распада, которое давала гипотеза Паули, ограничившись положительной оценкой подхода к ней, предложенного Бором [1, с. 238]. Отметим далее, что в Рим Паули приехал прямо из США, а из Италии направился в Лейден, где 31 октября ему была вручена медаль Лоренца. Перечисляя научные заслуги и достижения нового лауреата этой медали, Эренфест в приветственной речи ни словом не упоминает о нейтрино [20, с. 621].

Вскоре вслед за римской конференцией, в июле 1932 г., в Париже собрался Пятый международный конгресс по электричеству. В работе первой (физической) секции этого конгресса приняли участие М. де Бройль, Ф. Блох, П. Зееман, Мария Кюри, Р. Кронig, У. Кулидж, Ф. Лондон и др. На заседании секции 7 июля Ферми выступил с докладом «Современное состояние физики

* Ф. Разетти, комментируя статью Ферми [11, с. 521], полагает, что как раз тогда родилось название «нейтрино», но Паули в докладе в Цюрихе (1957 г.) [16, с. 392] говорил, со ссылкой на сообщение Э. Амальди, что оно появилось позднее — на семинарах Ферми в Риме, уже после открытия нейтрона Чэдвиком (февраль 1932 г.), чтобы отличить «частицу Паули» от тяжелого нейтрона Чэдвика. Укажем еще одну неточность в том же комментарии Разетти к статье Ферми: выступление Паули он относит к весне 1931 г. Добавим к этому любопытную деталь. Г. Вейль, выступая 10 декабря 1945 г. в институте перспективных исследований в Принстоне (сотрудником которого был в то время Паули) на церемонии, связанной с известием о присуждении Паули Нобелевской премии по физике, вспомнил, что в свое время частицу Паули называли в духе Ферми «паулино» [20].

ядра» [11, с. 458—472].* К этому времени Чэдвиком уже был открыт нейтрон, однако в основном тексте доклада излагается электрон-протонная модель ядра, а об открытии нейтрона упоминается буквально в 5 строчках — в качестве заключения к статье. Видимо, она была представлена до февраля 1932 г., и Ферми не перерабатывал ее для окончательной публикации, осуществленной уже после завершения работы конгресса.

В § 4 статьи Ферми, озаглавленном «Бета-лучи», говорится о внутриядерных, т. е. паулиевских, нейтронах, которые, как можно было бы себе вообразить, «согласно предположению Паули, ... испускались бы одновременно с β-частицами. Эти нейтроны могли бы проходить через большие толщи вещества, практически не теряя своей энергии, и потому были бы практически ненаблюдаемы. Существование нейтрона могло бы просто объяснить некоторые пока не понятные вопросы, такие, как статистика атомных ядер» [11, с. 468]. В дискуссии по докладу, отвечая на вопрос польского физика Вертенштейна о β-распаде, Ферми сказал, что испускаемые при этом нейтроны «являются не теми, которые были открыты (Чэдвиком, — *В. Ф.*), но нейтронами с гораздо меньшей массой» [11, с. 457—458]. Как видим, спустя год после того, как была высказана идея о нейтрино, Ферми, столь горячо, казалось бы, ее поддержавший, проявляет крайнюю сдержанность в вопросе о природе β-распада, хотя, как справедливо замечается в комментарии Б. М. Понтекорво, он «уже вполне осознал различие „большого" и „маленького" нейтронов» [11, с. 458]. Для нас, однако, существенно, что в итальянском журнале «Ric. Scientifica» от 15—31 августа 1932 г. конспективно излагается высказанная годом ранее идея Паули.

В упомянутых комментариях к парижскому докладу Ферми Э. Сегре отмечает, что за период с 1931 по 1933 г. прошло три важных международных совещания по физике: римская конференция, парижский конгресс и, кроме того, 7-й сольвеевский конгресс (Брюссель, октябрь 1933 г.). Однако как в нашей стране, так и в зарубежных работах по истории физики последние годы все больше внимания справедливо уделяется 1-й Всесоюзной ядерной конференции (Ленинград, конец сентября 1933 г.), которая, благодаря участию в ее работе выдающихся советских и зарубежных ученых (Г. Бека, В. Вейскопфа, П. Дирака, Ф. Жолио, Ф. Перрена, Ф. Разетти), сыграла большую роль в развитии физики ядра и являлась по существу международной. Рассказать здесь о ней имеет тем больший смысл, что 1983 г. — год 50-летия со дня ее проведения.

Ленинградская конференция проводилась под знаком открытия нейтрона и позитрона и выводов, которые следовали из этих открытий для широкого класса вопросов ядерной физики, начиная с новой протон-нейтронной модели ядра. Просмотр докладов и ознакомление с дискуссиями, возникавшими вокруг них [22],

* В [11] дан перевод статьи, опубликованной в итальянском журнале.

показывает, что проблема β-распада нашла должное отражение в ее работе, поскольку участники конференции неоднократно оперировали представлением о «нейтроне» Паули, называя его нейтрино.* О β-распаде идет речь в докладах (Иваненко, Жолио, Перрена) и в дискуссиях (Иваненко, Бека). При этом, хотя и подчеркивается гипотетический характер новой частицы, предложению Паули оказывается предпочтение перед предложением Бора (о невыполнении закона сохранения энергии). Поражает, насколько быстро сборник докладов ленинградской конференции увидел свет — в начале 1934 г.!

В этом же 1934 г. были опубликованы и материалы 7-го сольвеевского конгресса. На нем также говорилось о нейтрино, причем особенно подробно — в дискуссионном выступлении Паули по докладу В. Гейзенберга (оно воспроизведено на русском языке в [16, с. 393, 394]). В своем выступлении Паули заключает слово нейтрино в кавычки! Паули резко возражает против боровской концепции нарушения закона сохранения энергии и отказывается от своего предположения о наличии у нейтрино магнитного момента — предположения, высказанного им еще в письме от 4 декабря 1930 г.

В свете всего изложенного представляет особый интерес подстрочное примечание, сделанное И. Е. Таммом, как переводчиком московской (1937 г.) лекции Паули. В нем Тамм указывает, что впервые гипотеза Паули была изложена в печати в статье Карлсона и Оппенгеймера [22] с разрешения ее автора. Имеется в виду работа американских физиков, появившаяся в журнале «Physical Review» и датированная 15 сентября 1932 г. В этой статье рассматривается вопрос о взаимодействии с веществом релятивистских электронов и магнитных нейтронов (magnetic neutrons) — частиц Паули. Упоминается, что Паули ввел их в рассмотрение на семинаре по теоретической физике в Анн-Арборе летом 1931 г.,** надеясь с их помощью «разрешить некоторые трудности в теории ядер». Далее излагается первоначальная и позднее скорректированная Паули идея о том, что «такие нейтроны могли бы быть третьим элементом структуры ядер в дополнение к электронам и протонам; этим путем можно было бы понять аномалии спина и статистики некоторых ядер и кажущееся несоблюдение закона сохранения энергии при β-распаде» [23, с. 763]. Хотя в явном виде об одновременном испускании электрона и «нейтрона», по современной терминологии, нейтрино, при β-распаде и не говорится, формально в статье [23] частица, введенная в рассмотрение Паули, также упоминается в связи с проблемой β-распада. Говорится в статье [23] и о нейтронах с массой протона («проникающая бериллиевая радиация»), однако почему-то без ссылок на работы Чэдвика, хотя статья [23] послана в печать в июле 1932 г., т. е. несколько месяцев спустя после открытия английского ученого.

Итак, первые печатные упоминания о гипотезе Паули появились практически одновременно, с интервалом всего в две недели, в статье Э. Ферми «Современное состояние физики ядра» [11, с. 458—472] и в статье американских авторов [23], как это и указано (видимо, со слов Паули) в примечании И. Е. Тамма. Термин «нейтрино» возник в начале 1932 г. в Риме и фигурировал в обсуждении на конференциях осенью 1933 г. (сначала в Ленинграде, а потом в Брюсселе). Он впервые появился в печати в статье Э. Ферми, опубликованной в итальянском журнале «Ric. Scientifica», выходившем раз в две недели, в номере от 31 декабря 1933 г. [24]. Дата получения статьи Ферми, в отступление от правил, принятых в этом журнале, не указана, но ясно, что она направлена в него уже после окончания сольвеевского конгресса (в номере от 31 декабря опубликованы материалы, поступившие в журнал в промежуток от августа до декабря 1933 г.). Ну и, конечно, о нейтрино непосредственно говорится и в знаменитой статье Ферми «К теории β-распада», увидевшей свет в журнале «Zeitschrift der Physik» [11, с. 525—541], хотя и в ней «крестный отец» нейтрино заключает название паулевской частицы при первом упоминании о ней в кавычки!

* Впервые на конференции эта частица упомянута в докладе Д. Д. Иваненко [22, с. 53].

** В Анн-Арборе в то время работала небольшая теоретическая группа, в которую входили С. Гаудсмит и Д. Уленбек. 7 мая 1931 г. Я. И. Френкель писал оттуда: «На летний семестр в Анн-Арбор приезжают Зоммерфельд и Паули» [2, с. 292]. Добавим, что, в довершение неточности (см. с. 238), Паули, судя по московскому своему докладу, первое сообщение о нейтрино сделал на лекциях в Калифорнийском университете тем же летом 1931 г. Вероятнее всего, о нейтрино он говорил во всех этих трех местах, но начал, думается, со съезда в Пасадене.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Эренфест—Иоффе*: Научная переписка. Л.: Наука, 1973.
2. *Френкель В. Я.* Яков Ильич Френкель. Л.: Наука, 1966.
3. *Френкель Я. И.* Соб. изб. тр. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
4. *Френкель В. Я.* Пауль Эренфест. М.: Атомиздат, 1977.
5. *Wolfgang Pauli.* Scientific Correspondance with Bohr, Einstein, Heisemberg a. l. Bd 1, 1919—1929. N. Y.; Heidelberg; Berlin: Springer Verlag, 1979.
6. *Ландау Л. Д.* Отчет о научной заграничной командировке в Данию, Швейцарию и Германию в 1929—1931 г. — Архив ФТИ, ф. 1, оп. 1, ед. хр. 119.
7. *Румер Ю. Б.* Странички воспоминаний о Л. Д. Ландау. — Наука и жизнь, 1974, № 6, с. 99—101.
8. 1-й Всесоюзный съезд физиков: Перечень докладов, представленных на съезд, с кратким их содержанием. Л.: НХТИ, 1930.
9. Материалы 2-й Всесоюзной конференции по атомному ядру. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1938, № 1—2.
10. *Паули В.* Некоторые принципиальные замечания относительно теории β-распада. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1938, № 1, 2, с. 149—152.
11. *Ферми Э.* Научные труды. Т. 1. М.: Наука, 1971.
12. *Понтекорво Б. М.* Детство и юность нейтринной физики: некоторые воспоминания. — Природа, 1983, № 1, с. 43—57.
13. *Ферми Э.* Элементарные частицы. М.: ИЛ, 1952.
14. *Френкель В. Я.* О восприимчивости к новым физическим идеям и результатам. — В кн.: Научное открытие и его восприятие. М.: Наука, 1971, с. 296—307.
15. *Добротин Н.* 2-я Всесоюзная конференция по атомному ядру. — УФН, 1937, 18, вып. 4, с. 583—592.
16. Теоретическая физика 20 века. М.: ИЛ, 1962.

17. *Паули В.* Физические очерки. М.: Наука, 1975.
18. *Meyenn K., von.* Pauli, das Neutrino und die Entdeckung des Neutrinos vor 50 Jahren. — Naturwiss., 1982, Bd 69, S. 564—573.
19. *Loeb L.* Proceedings of the American Physical Society: Minutes of the Pasadena Meeting. June 15 to 20, 1931. — Phys. Rev., 1931, **38**, N 3, p. 579—591.
20. *Weyl H.* Encomium. — Sci., 1946, **103**, N 2669, p. 216—218.
21. *Ehrenfest P.* Collected Scientific Papers. Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1959.
22. Атомное ядро: Сб. докладов 1-й Всесоюзной ядерной конференции / Под ред. М. П. Бронштейна, В. М. Дукельского, Д. Д. Иваненко, Ю. Б. Харитона. Л.; М.: ГТТИ, 1934.
23. *Carlson J. F., Oppenheimer J. R.* The impacts of fast electrons and magnetic neutrons. — Phys. Rev., 1932, **41**, N 6, p. 763—792.
24. *Fermi E.* Tentativo di una teoria dell' emissiona dei raggi «beta». — Ric. Scient., 1933, **4 (2)**, N 12, p. 491—495.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

Экситоны, твердое тело, пучки

А. А. Каплянский. Экситоны в полупроводниках. Из истории открытия, последние исследования в ФТИ 5

Г. А. Смоленский, Л. А. Шувалов. История развития сегнетоэлектричества в СССР. От Курчатова до наших дней 19

Л. С. Стильбанс. Термоэлектричество в ФТИ. Прошлое, настоящее, будущее 27

А. П. Гринберг. К истории метода встречных пучков 52

А. И. Слуцкер, В. С. Рыскин. Эволюция учения о прочности твердых тел 69

В. С. Куксенко, В. А. Петров. Физика разрушения твердых тел и прогноз землетрясений 79

Космология и эволюция

Д. А. Варшалович, С. А. Левшаков. Спектроскопия квазаров и космология 85

Л. Э. Гуревич. Современная космическая физика 97

В. Ф. Левченко, Я. И. Старобогатов. Два аспекта эволюции жизни: физический и биологический 102

Из истории физики

А. П. Александров. Воспоминания о Павле Павловиче Кобеко 143

В. Я. Френкель. Материалы к биографии Павла Павловича Кобеко 148

П. Н. Федосеев. А. Ф. Иоффе 167

А. Ф. Иоффе. Памяти А. А. Чернышева 170

А. П. Гринберг. Об одном забытом изобретении А. А. Чернышева 173

В. Я. Френкель. О заседании Ученого совета ФТИ, посвященном памяти А. А. Чернышева и Д. А. Рожанского 178

А. Г. Остроумов, А. А. Рогачев. О. В. Лосев — пионер полупроводниковой электроники 183

В. Паули. Законы сохранения в теории относительности и атомной физике 217

В. Я. Френкель. К ранней истории нейтрино 232

ФИЗИКА: ПРОБЛЕМЫ, ИСТОРИЯ, ЛЮДИ

Утверждено к печати
ордена Ленина Физико-техническим институтом
им. А. Ф. Иоффе АН СССР

Редактор издательства Т. И. Сушкова
Художник Г. В. Смирнов
Технический редактор З. А. Соловьева
Корректоры
О. В. Олендская, Л. А. Привалова
и Т. Г. Эдельман

ИБ № 21143

Сдано в набор 18.11.85. Подписано к печати 4.03.86. М-25415. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная № 1. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Фотонабор. Усл. печ. л. 15.50. Усл. кр.-отт. 15.50. Уч.-изд. л. 17.15. Тираж 4350. Тип. зак. 1006. Цена 2 р.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Наука». Ленинградское отделение
199034, Ленинград, В-34, Менделеевская линия, 1

Ордена Трудового Красного Знамени
Первая типография издательства «Наука»
199034, Ленинград, В-34, 9 линия, 12

УДК 530.21

Экситоны в полупроводниках: Из истории открытия, последние исследования в ФТИ. Каплянский А. А. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 5—19.

Дается обзор основополагающих теоретических (1931 г.) и экспериментальных (1951 и последующие годы) исследований, приведших к современной концепции квантовой квазичастицы экситона. Обе серии работ, в результате которых был предсказан и открыт экситон, выполнены в ФТИ. Рассказывается о работах этого направления, проводившихся в ФТИ в последующие годы. Кратко излагаются вопросы, относящиеся к прикладным экситонным исследованиям, когда с помощью экситонов получают уникальные сведения о кристаллической решетке. Обсуждаются проблемы оптики экситонов.

УДК 537.226.33

Из истории развития сегнетоэлектричества в СССР. От Курчатова до наших дней. Смоленский Г. А., Шувалов Л. А. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 19—27.

Рассматриваются вопросы истории развития сегнетоэлектричества как области физики твердого тела. Начало систематическому изучению этих вопросов было положено в 20—30-е годы в лаборатории И. В. Курчатова в ФТИ. На примере сегнетоэлектриков показано единство и взаимообогащающее влияние фундаментальных и прикладных исследований. Подчеркивается роль открытия сегнетоэлектрических свойств титаната бария (1944 г.) для последующего прогресса в исследованиях сегнетоэлектричества. Приводятся основные результаты этих исследований — вплоть до наших дней.

УДК 537.32

Термоэлектричество в ФТИ: Прошлое, настоящее, будущее. Стильбанс Л. С. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 27—52.

Изложена история развития работ в ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР в области исследования и применений термоэлектрических явлений, начиная с 30-х годов по настоящее время Основное внимание уделено изучению физических процессов в термоэлементах и разработке термоэлектрических преобразователей. Рассматриваются также перспективы дальнейших исследований в области термоэлектрического преобразования энергии. Библ. 26 назв.

УДК 621.384.665(09)

К истории метода встречных пучков. Гринберг А. П. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 52—69.

В обзоре изложены теоретические основы метода встречных пучков и история проектирования и сооружения первых установок (1960—1971). Особое внимание уделено вкладу Г. И. Будкера и его сотрудников (Институт ядерной физики СО АН СССР, г. Новосибирск) в теорию и практику метода встречных пучков. Библ. 58 назв., ил. 5.

УДК 539.4

Эволюция учения о прочности твердых тел. Слуцкер А. И., Рысин В. С. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 69—78.

Рассмотрены этапы развития представлений о механической прочности твердых тел. На первом этапе нагруженные твердые тела рассматриваются как сплошные упругие или вязкоупругие среды, затем — как конструкции из атомов. Проводится расчет теоретической прочности, который уточняется за счет учета влияния на разрушение тепловых колебаний атомов. Это приводит к формированию представлений о разрушении как о процессе. Прослеживается переход от метафизических взглядов на изучение проблемы ко все более диалектической форме, что и определяет достижения и перспективы этой науки.

УДК 538.9:550.348.436

Физика разрушения твердых тел и прогноз землетрясений. Куксенко В. С., Петров В. А. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 79—84.

Развивается представление о том, что установление кинетической природы и механизма разрушения позволяют прогнозировать разрушение нагруженных тел. Подобие характеристик разрушения на различных масштабных уровнях, отражающее единство физической картины мира, открывает возможности использования лабораторных разработок для прогноза землетрясений. Библ. 3 назв.

УДК 524.8

Спектроскопия квазаров и космология. Варшалович Д. А., Левшаков С. А. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 85—97.

Рассматривается история открытия квазаров, их характеристики и интерпретация данных наблюдений. Особое внимание уделено анализу спектров квазаров — основному источнику уникальной информации о физических условиях и химическом составе вещества на ранних этапах эволюции Вселенной. Библ. 10 назв., ил. 4.

УДК 524.8:1

Современная космическая физика. Гуревич Л. Э. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 97—102.

В историческом аспекте рассматриваются вопросы эволюции звезд и новейшего развития релятивистской космологии. Ее проблемы, проблемы общей теории относительности, космологические выводы этой теории увязываются с концепцией диалектического материализма. Дан краткий обзор основных новых открытий и теорий, относящихся к вопросам космологии и их трактовке. Библ. 4 назв.

УДК 557.21«71» : 577.462

Два аспекта эволюции жизни: физический и биологический. Левченко В. Ф., Старобогатов Я. И. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 102—142.

В развитии биогеосферы за последние 550—570 млн лет наблюдалась цикличность. Биогеосферу можно рассматривать как единую биосистему, что в совокупности с функциональным подходом к понятию жизни позволяет сформулировать механизм ее физической эволюции. Эволюция биогеосферы происходит в сторону увеличения потока используемой ею солнечной энергии и инициируется колебаниями условий на планете, в частности климатическими изменениями в периоды оледенений и изменениями в поступлении CO_2 из недр Земли. Биологическая эволюция невозможна без физической эволюции биогеосферы. Библ. 40 назв., ил. 13.

УДК 53(092)

Воспоминания о Павле Павловиче Кобеко. Александров А. П. — В кн.: Физика: проблема, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 143—148.

Статья написана в качестве послесловия к воспоминаниям о П. П. Кобеко Н. М. Рейнова. Рассказывается о встрече автора с П. П. Кобеко в осажденном Ленинграде и о работе

ученого в трудных условиях блокады. Дается также краткий обзор научных результатов, полученных П. П. Кобеко в довоенные годы в ФТИ, говорится о творческой и гражданской личности Кобеко. Ил. 1.

УДК 53(092)

Материалы к биографии Павла Павловича Кобеко. Френкель В. Я. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 148—167.

Приводятся документы, относящиеся к биографии выдающегося советского физика-экспериментатора П. П. Кобеко. Специальное внимание уделяется обзору его работ по физике диэлектриков, сегнетоэлектричеству, аморфному состоянию и полимерам. Рассказывается о работах П. П. Кобеко в годы войны, когда он возглавил филиал Физико-технического института и проводил исследования большого оборонного значения. Библ. 12 назв.

УДК 53(092):1

А. Ф. Иоффе. Федосеев П. Н. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 167—170.

Статья представляет собой изложение доклада, сделанного на заседании, посвященном столетию со дня рождения акад. А. Ф. Иоффе. Основное внимание уделено обзору тех работ и публикаций А. Ф. Иоффе, которые в наибольшей степени смыкаются с философскими проблемами науки, физики в частности. Анализируется книга А. Ф. Иоффе «Основные представления современной физики» и дается оценка возникшей вокруг нее дискуссии. Ил. 1.

УДК 53(092)

Памяти А. А. Чернышева. Иоффе А. Ф. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 170—173.

Статья представляет собой отредактированную стенограмму выступления А. Ф. Иоффе на заседании Ученого совета Физико-технического института в апреле 1940 г., посвященного памяти скончавшегося в этом же месяце одного из основателей ФТИ акад. А. А. Чернышева. Говорится об организаторской деятельности А. А. Чернышева, а также о его научных исследованиях в первую очередь в области электротехники и высоковольтной техники. Ил. 1.

УДК 621.384.659(09)

Об одном забытом изобретении А. А. Чернышева. Гринберг А. П. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 173—178.

А. А. Чернышев в патентной заявке 1926 г. предложил принцип каскадного расположения нескольких высоковольтных вакуумных трубок, предназначенных для ускорения электронов, как способ, дающий возможность существенно повысить суммарную энергию ускоряемых электронов. Известное аналогичное изобретение У. Д. Кулиджа (США) было сделано позже. Библ. 8 назв, ил. 2.

УДК 53(092)

О заседании Ученого совета ФТИ, посвященного памяти А. А. Чернышева и Д. А. Рожанского. Френкель В. Я. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 178—183.

Дан обзор выступлений на объединенном заседании Ученого совета ФТИ им. А. Ф. Иоффе и институтского философского семинара, посвященных 100-летию со дня рождения сотрудников института — акад. А. А. Чернышева и чл.-корр. АН СССР Д. А. Рожанского. А. А. Чернышев получил известность своими исследованиями и изобретениями в области электро- и радиотехники, телевидения. Д. А. Рожанский — крупный советский физик и радиофизик, один из основоположников советской радиолокации. Его работы относятся также к теории распространения радиоволн и газовому разряду. Кратко излагаются воспоминания об ученых.

УДК 53(092):621.315.592

О. В. Лосев — пионер полупроводниковой электроники. Остроумов А. Г., Рогачев А. А. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 183—217.

Излагаются основные работы пионера полупроводниковой электроники Олега Владимировича Лосева, относящиеся к 20—30-м годам. Приводятся краткие сведения о его биографии. С позиций современных представлений о физике полупроводников и полупроводниковых приборов рассматриваются результаты исследований О. В. Лосева в области усиления и генерации электромагнитных колебаний структурами на основе цинкитных кристаллов, трансформации частоты колебаний (трансгенерация), электролюминесценции карбида кремния. Ил. 10.

УДК 53(092)

Законы сохранения в теории относительности и в атомной физике. Паули В. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 217—232.

Статья, составленная на основе популярной лекции, прочитанной В. Паули в Москве в октябре 1937 г. (перевод И. Е. Тамма). Рассматриваются проблемы сохранения энергии, импульса и заряда в старой и новой физике. Анализируется ситуация в механике точки. Эти же проблемы рассматриваются в рамках теории электромагнитного поля и общей теории относительности. Наконец, дается обзор состояния в атомной физике и физике ядра, сложившегося к началу второй половины 30-х годов.

УДК 53(092)

К ранней истории нейтроно. Френкель В. Я. — В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Л.: Наука, 1986, с. 232—242.

Дается обзор контактов выдающегося швейцарского физика-теоретика В. Паули с советскими физиками. Обсуждаются вопросы, относящиеся к ранней истории нейтрино, в частности дискуссии и суждения о свойствах этой частицы, имевшие место в Риме, Париже, Ленинграде и Брюсселе в 1931—1933 гг. Библ. 24 назв., ил. 1.