

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

А. Ф. ИОФФЕ

# О ФИЗИКЕ И ФИЗИКАХ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
Ленинград 1977

О физике и физиках. Иоффе А. Ф. Л., «Наука», 1977. 260 с.

В книге собраны научно-популярные работы выдающегося советского физика А. Ф. Иоффе. В них рассматриваются общие проблемы атомной и квантовой физики, физики полупроводников и агрофизики, затрагиваются вопросы организации науки и ее преподавания. Значительную их часть составляют мемориальные статьи, посвященные выдающимся физикам XX в. Сборник завершает большая статья автобиографического характера. Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся историей физики.

Рис. 8.

Ответственный редактор  
академик С. Н. ЖУРКОВ

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Академией наук СССР предпринято издание избранных трудов выдающегося советского ученого — академика А. Ф. Иоффе. В 1974 г. вышел из печати первый том, посвященный механическим и электрическим свойствам твердых тел, в 1975 г. — второй том, в который собраны его работы по излучению, электронам и полупроводникам.\* В настоящий сборник вошли по преимуществу научно-популярные статьи.

Человек увлекающийся, умеющий своим словом увлечь других, А. Ф. Иоффе был ярким пропагандистом достижений советской и мировой физики. Этой части своей деятельности он придавал большое значение и уделял ей много времени и сил.

В публикуемых работах А. Ф. Иоффе выступает как последовательный материалист-диалектик, убедительно доказывающий, что новые открытия в физике, противоречившие привычным и установившимся взглядам, отнюдь не противоречат теории марксистской диалектики, как утверждали ополчавшиеся на соответствующие работы по квантовой механике и теории относительности некоторые философы, а, напротив, иллюстрируют жизненность, справедливость и силу идей В. И. Ленина, высказанных в его книге «Материализм и эмпириокритицизм».

Начиная с 1930 г. большое количество популярных статей А. Ф. Иоффе посвятил полупроводниковым материалам, правильно усматривая огромные перспективы, которые открываются перед техникой при использовании уникальных электрических и фотоэлектрических свойств этих материалов. В соответствующий раздел сборника включены также самые последние по времени написания статьи А. Ф. Иоффе.

Специальный раздел сборника составляют статьи по агрофизике — области, развивающейся на стыке двух наук. А. Ф. Иоффе был родоначальником этих исследований и бесценно возглавлял организованный им в 1932 г. Агрофизический институт. Начатые

---

\* Иоффе А. Ф. Избр. тр. В 2-х т. Механические и электрические свойства кристаллов, т. I; Излучение. Электроны. Полупроводники, т. II. Л., «Наука». 1974, 1975

в этом институте исследования являются той основой, на которой сейчас проводится внедрение физических и математических методов в сельское хозяйство; роль работ школы Иоффе в этом плане трудно переоценить. Стоит специально подчеркнуть, что более 40 лет тому назад А. Ф. Иоффе поднимал вопросы об охране окружающей природы, предостерегая от последствий, к которым может привести нерациональное использование ее богатств.

Значительное место в сборнике занимают статьи, посвященные истории науки, становлению советской физики. А. Ф. Иоффе встречался с рядом выдающихся ученых нашего века, и его мемориальные статьи, посвященные Рентгену, «радиоактивному семейству» Кюри, Планку, Эйнштейну, Эренфесту, А. Н. Крылову, Я. И. Френкелю, представляют большой интерес — тем более, что написаны они с большим мастерством и блеском. Книгу закрывает статья А. Ф. Иоффе автобиографического характера.

Мы уверены, что сборник научно-популярных работ А. Ф. Иоффе, раскрывающий еще одну грань его многостороннего таланта, будет с интересом встречен читателями.

*Академик С. Н. Журков*

# КВАНТЫ, ЯДРА, АТОМЫ, ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

## АТОМЫ СВЕТА

### ОСНОВНЫЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ ТЕОРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Электромагнитная теория света, казалось, дает исчерпывающее описание свойств лучистой энергии. Она устранила вопрос о направлении колебаний в поляризованном луче света, направив, согласно Фрепелю, электрическую силу перпендикулярно к плоскости поляризации, а магнитную, согласно Нейману, — в плоскости поляризации. Оптические свойства и константы различных тел получили объяснение через их электрические свойства. Наконец, световое давление, обнаруженное и измеренное на опыте П. Н. Лебедевым, явилось новым блестящим подтверждением теории Максвелла. При помощи этого давления были выведены и два основных закона теплового «черного излучения» — закон Стефана—Больцмана и закон смещения Вина.

Однако учение о свете встретилось здесь с первым крупным противоречием. Основной задачей в этой области является вопрос о распределении энергии в спектре абсолютно черного тела. Простейший путь для решения этого вопроса был указан Рэлеем и разработан Джинсом. Исходя из того положения, что в состоянии полного теплового равновесия энергия распределяется поровну между всеми степенями свободы, Джинс подсчитал число степеней свободы для прямоугольного параллелепипеда. Оно определяется числом гармонических собственных колебаний данного пространства. Затем в это пространство помещается некоторое число газовых молекул, средняя кинетическая энергия которых пропорциональна, как известно, абсолютной температуре. Приписывая теперь каждой степени свободы эфира ту же среднюю энергию, как и молекуле газа, мы получаем определенный закон распределения энергии, который, однако, самым резким образом противоречит всем данным опыта. И не прозвоя вычислений, легко видеть, что при таком подсчете число собственных колебаний, обладающих длиной волны, большей данной величины, будет конечным, тогда как число колебаний с более короткой волной будет бесконечно велико. Таким образом,

вся энергия перейдет к бесконечно коротким волнам, а на каждую степень свободы придется бесконечно малая энергия, т. е. в равновесном состоянии вся энергия из молекул газа перейдет в эфир и притом непрерывно будет переходить ко все более коротким волнам, другими словами, теплового равновесия не существует. Практически это значит, что энергия замкнутой системы будет постепенно переходить в лучистую все большей частоты — система сама собой пройдет все степени накапливания и наконец даст чисто ультрафиолетовый спектр.

К той же неверной формуле Джинса пришел и Лоренц, но другим, чисто физическим путем, рассматривая излучение как сумму электромагнитных импульсов, испускаемых электронами при изменении скорости их движения в металле в момент столкновения с молекулами. Вычислив энергию, испускаемую и поглощаемую пластинкой металла, и разделив первую на вторую, Лоренц получил для излучения черного тела формулу Джинса. Однако при выводе формулы Лоренц ограничился рассмотрением лишь тех случаев, когда свободный путь электронов велик по сравнению с теми частями, где скорости быстро меняются. Таким

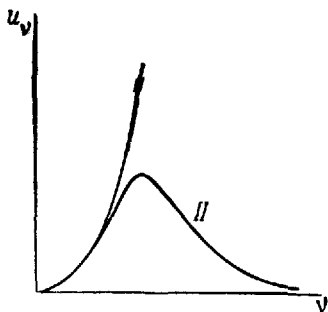


Рис. 1.

образом, формула Лоренца выведена лишь для больших длин волн, где она действительно оправдывается. Для более коротких волн вывод Лоренца может быть несколько изменен, но нельзя пока показать, что он и здесь даст согласие с опытом.

С другой стороны, опытным путем вопрос о распределении энергии в спектре черного тела изучен с большой точностью. На рис. 1 кривая I соответствует формуле Джинса для заданной температуры  $T_0$ , а кривая II — опытной кривой; причем по оси абсцисс нанесены числа колебаний света  $\nu$ , а по оси ординат — энергия в одном кубическом сантиметре эфира, «соответствующая» числу колебаний, т. е. отношение между плотностью энергии данного промежутка между  $\nu$  и  $\nu + d\nu$  и величиной этого промежутка  $d\nu$ :

$$\frac{du}{d\nu} = u_\nu.$$

#### ПОЯВЛЕНИЕ АТОМОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

М. Планку, исходя из тех же основных представлений, а именно: из соединения электромагнитной теории со статистическими соображениями, основанными на теории вероятностей, удалось прийти к формуле, находящейся в полном согласии с самыми точными измерениями. Как показал П. С. Эренфест, вывод

Планка основан на следующем совершенно новом и неожиданном предположении: «Лучистая энергия может излучаться или поглощаться отдельным резонатором лишь целыми порциями, величина которых пропорциональна числу колебаний данного резонатора; причем коэффициент пропорциональности  $h$  есть универсальная постоянная, равная в абсолютной системе единиц  $6.55 \cdot 10^{-27}$  эрг-сек». Если в формуле Планка положить  $h=0$ , то мы снова получим формулу Джинса. Таким образом, и самое существование максимума в кривой  $I$ , и его положение тесно связаны с величиной  $h$ .

Теория Планка и в настоящее время, через 10 лет после ее появления, является единственной, согласной с данными опыта. Более того, П. С. Эренфест показал, что, рассматривая вопрос о черном излучении как статистическую задачу о наиболее вероятнейшем распределении энергии между всеми числами колебаний  $\nu$ , мы из данных опытных измерений с неизбежностью приходим к утверждению, что в процессе перераспределения энергии могут появляться и исчезать только целые кратные числа  $h\nu$ , только они обладают конечной вероятностью. Все же промежуточные значения обладают вероятностью, равной нулю. Недостаточно, оказывается, принять, что эти значения более вероятны, чем другие; приходится допустить, что все другие невозможны. Такой результат противоречил бы самой теории вероятности, если бы в основе его не лежало новое, неизвестное прежде свойство лучистой энергии или же того механизма, который создает излучение. Каково же содержание и смысл этого нового свойства? Мы встретились с ним как с атомами лучистой энергии, которые, однако, существенно отличаются от всех известных нам атомов (материи и электричества) уже тем, что величина их есть непрерывная функция числа колебаний и может быть, например, изменена при встрече лучистой энергии с движущимся зеркалом (так как по принципу Доплера изменяется число колебаний  $\nu$ ).

Кроме того, атомы энергии относятся исключительно к строго монохроматическому свету, тогда как процесс излучения мы представляем себе часто как неправильные электромагнитные импульсы, разлагаемые в гармонические колебания решеткой или призмой. Естественно, однако, что тот путь, который привел нас к «атомам энергии», не мог выяснить их природы, так как мы исходили из суммарного теплового черного излучения, рассматривая его для удобства анализа как сумму монохроматических колебаний.

## НЕКОТОРЫЕ АНАЛОГИИ

Внутренний смысл этого чрезвычайно сложного вопроса может быть, однако, значительно упрощен более конкретными аналогиями с кинетической теорией газов. Такие аналогии можно строить двумя путями.

1. Обычно различные числа колебаний сравнивают с различными газами; установлению температурного равновесия соответствует процесс диффузии газов; очевидно, тогда на одну молекулу любого газа приходится в среднем одинаковая энергия, и мы неизбежно приходим к формуле Джинса. Формула Планка получится, если предположить, что каждая молекула данного газа (отвечающего определенному числу колебаний  $\nu$ ) может воспринимать энергию лишь в количествах, кратных  $h\nu$ , т. е. введем действительно совершенно новую гипотезу, не имеющую никакой аналогии с кинетической энергией газов.

2. Можно, однако, провести аналогию с газом и в другом направлении: числа колебаний  $\nu$  можно считать аналогичными температуре газа  $T$ . Подобно тому, как энергию газа  $U$  мы выражаем произведением числа молекул на абсолютную температуру и на универсальный множитель  $(3/2) k$ :

$$U = N \frac{3}{2} kT = N \frac{1}{2} \mu v^2,$$

и энергию излучения можно представить произведением среднего числа колебаний  $\nu$  на некоторую величину  $P$ , которую можно также разбить на два множителя  $N$  и  $h$ , где  $h$  — также универсальная постоянная;  $U = N h \nu$ . Замечательно, что при всяком механическом воздействии на лучистую энергию число  $N$  не изменится, как не изменится и число атомов газа. Атомы излучения  $h$  в этом представлении аналогичны атомами материи  $\mu$  или заряду электрона  $e$ , тогда как числу колебаний  $\nu$  соответствует  $(1/2) v^2$  или потенциал  $V$ . Энергия одного атома в этих трех случаях равна:  $h\nu$ ,  $1/2 \mu v^2$ , eV. Атомы излучения все равны между собою и не зависят от  $\nu$ , следовательно, могут существовать и для неоднородного света, причем энергия одного атома выразится произведением  $h$  на число  $\bar{\nu}$ , представляющее некоторую среднюю величину, образуемую разложением в ряд Фурье и определяющую «потенциал» излучения. Такое понимание подтверждается обоснованным предположением того, что число колебаний  $\nu$  или, более общее,  $\bar{\nu}$  играют ту же роль для света, какую квадрат скорости играет для газовых частиц или потенциал для электронов.

Есть такая аналогия соответствует действительности, то вопрос о распределении энергии и изложенные следствия его получают чрезвычайно простое истолкование: это распределение аналогично распределению тепловой энергии по скоростям газовых частиц. Можно представить себе прибор, аналогичный дифракционной решетке. Положим, имеется небольшой объем, заполненный газом. В определенный момент стенки его удаляются, тогда молекулы удаляются в пространство, двигаясь по инерции. Через некоторое время  $t$  мы создаем ряд перегородок на различных расстояниях  $r$  от первоначального положения газа. Внутри каждой перегородки останутся те частицы, которые обладали скоростями



$r/t$ ; таким образом, мы получили «спектр» газа по скоростям. Если бы по оси абсцисс нанести  $(1/2)v^2$ , а по оси ординат — общую энергию тех частиц, которые этой скоростью обладали, то мы получили бы кривую, сходную с кривой II, выражающей соответственную зависимость для газа. Количественного совпадения не будет, если мы примем только один род молекул в газе — простые атомы; если же мы допустим и возможность ассоциации их, т. е. примем возможность появления двухатомных, трехатомных и т. д. молекул, то придем и к полному количественному совпадению с формулой Планка, а следовательно, и с опытом. Чем меньше мы возьмем атомный вес  $\mu$ , тем меньшей энергией будет обладать молекула при заданной скорости  $v$ , тем больше будет средняя скорость газовых частиц при данной температуре. Максимум в кривой II будет перемещаться в сторону больших скоростей. При  $\mu=0$  мы пришли бы к кривой I, выражающей закон Джинса. Если бы, следовательно, описанный идеальный опыт дал бы нам для газа кривую II вместо ожидаемой I, то мы заключили бы, что атомы газа конечны, и вычислили бы атомный вес газа из положения максимума. Точно так же из формы кривой II для черного излучения мы заключаем о конечной величине атомов излучения  $h$ , а по максимуму определяем  $h=6.55 \cdot 10^{-27}$  эрг · сек.

Каким же образом появились, однако, атомы энергии, о которых нет речи в кинетической теории газов? Они возникают лишь при первой аналогии, вторая же аналогия объясняет их появление неправильной постановкой вопроса: энергия молекулы изменяется непрерывно, но если мы поинтересуемся энергией молекулы, обладающей данной скоростью  $v$ , то она, очевидно, может быть только или  $1/2 \mu v^2$ , или  $2 1/2 \mu v^2$ , или  $3 1/2 \mu v^2$  и т. д. в зависимости от числа атомов в молекулах, но не может принимать промежуточных значений. Таким образом, хотя все скорости для данной молекулы равновозможны, но энергия молекулы данной скорости есть всегда целое кратное  $1/2 \mu v^2$ . Итак, те же логические затруднения существовали бы и для кинетической теории газа, если бы она с самого пачала не ввела понятие о неделимом атоме. И в учении об излучении удобнее поэтому говорить об атомах излучения  $h$ , а не об атомах лучистой энергии  $h\nu$ .

Планк называет величину  $h$  элементом действия, так как она измеряется произведением энергии на время, как и в принципе наименьшего действия.

## ДВЕ РАЗЛИЧНЫЕ ФОРМУЛИРОВКИ НОВОЙ ГИПОТЕЗЫ

Относительно причины появления новой универсальной величины  $h$  — атома излучения в учении о свете существуют две различные точки зрения.

1. Одна переносит вопрос в незнакомый нам механизм лучеиспускания атома или вообще электромагнитного резонатора. Решая задачу о распределении энергии между резонаторами,

Планк принял, что данный резонатор, обладающий заданным числом колебаний  $\nu$ , может получать только целые порции  $h\nu$  энергии. В новейшее время Планк показал, что можно ограничиться даже допущением, что только лучеиспускание происходит порциями  $h\nu$ , тогда как поглощение идет непрерывно.

2. Вторая точка зрения идет еще дальше: она предполагает, что атомы излучения являются свойством лучистой энергии, объясняются структурой электромагнитного поля. Ее придерживались Эйнштейн, давший ей энергетическое обоснование, и Дж. Дж. Томсон, исходивший из определенной модели электромагнитного поля.

Первая точка зрения имеет то удобство, что она не изменяет свойств электромагнитного поля, так хорошо выражаемого непрерывной теорией Максвелла. Она переносит загадку и без того в загадочную сферу внутриатомного поля. Притом дело уже не ограничивается испусканием лучистой энергии: величина  $h\nu$  определяет и те количества, в которых может обмениваться молекулами и тепловая энергия. Молекула (резонатор), обладающая числом собственным колебаний  $\nu$ , может отдавать лишь целые порции  $h\nu$  энергии. Несовершенство этой точки зрения заключается в том, что она оставляет загадочную универсальность величины  $h$ . Казалось бы, что если все дело в механизме атома, то различные механизмы, встречающиеся в разных телах и свободных электронах в металле, должны бы дать численно различные величины  $h$ .

Вторая точка зрения, наоборот, естественно приводит к универсальности  $h$ , так как световой эфир во всех телах один и тот же, но ее последовательное проведение наталкивается на ряд противоречий в объяснении явлений интерференции и дифракции. О значении этих затруднений ничего пока сказать нельзя, так как более детальной картины лучистой энергии в атомном ее понимании не существует.

Не существует никаких определенных представлений об объеме, занимаемом одним атомом, и даже о том, нужно ли их считать независимо существующими в эфире, можно ли каждому атому излучения приписывать только одно определенное направление движения или же представлять себе их расходящимися по сферам. Предполагается лишь, что принятие атомной структуры излучения приведет к тем же формулам, что и теория Максвелла во всех тех явлениях, где мы имеем дело с очень большим числом атомов света, подобно тому, как теория упругости вполне уживается с атомным строением тел.

## ПРОЯВЛЕНИЕ НОВОГО СВОЙСТВА ПРИ ДЕЙСТВИИ СВЕТА НА ТЕЛА

Если основная гипотеза Планка справедлива, то это новое свойство должно проявиться, и притом гораздо в более резкой форме, не только в черном излучении, но и во всех других явле-

ниях, в которых участвует лучистая энергия. При этом заметим, что результат останется в главных чертах тем же, станем ли мы на первую или на вторую точку зрения, так как влияние света сказывается только тогда, когда он поглощается телом (резонатором). Относящиеся сюда явления чрезвычайно разнообразны: фотоэлектричество и вторичные катодные лучи, вызываемые рентгеновскими лучами, фотохимия, ионизация газов, флюоресценция и фосфоресценция, свечение закатодных лучей.

В каком виде могут здесь проявиться уже изложенные нами свойства атомов излучения? Необходимо помнить, что во всех этих случаях происходит переход лучистой энергии в иную при помощи особого механизма данного явления. Если мы допустим, что каждая молекула тела поглощает всегда только целые атомы излучения, то от механизма явления будет еще зависеть, какая часть пойдет на данный эффект, например на кинетическую энергию электрона или на излучаемый свет флюоресценции. Нельзя поэтому ожидать количественного совпадения, если мы, устранив вопрос о механизме явления, отождествим действие молекулы с действием поглощенного ею света.

Зато можно ожидать следующего качественного согласия с теорией. Энергия электрона, испускаемого одной молекулой, не должна превышать энергии одного, двух-трех атомов излучения. С увеличением числа колебаний энергия должна возрасти приблизительно в том же соотношении  $h\nu$ .

Очевидно, с другой стороны, что каковы бы ни были законы этих явлений, как бы они хорошо ни совпадали с требованиями атомной теории, всегда их можно отнести за счет специального механизма данного явления; поэтому они могут только подтверждать, а не доказывать атомную теорию. Подтверждение это будет, однако, тем серьезнее, чем большая область фактов найдет в атомной теории свое простейшее истолкование, так как тогда больше оснований принять одну новую гипотезу, чем стоять перед целой серией эмпирических закономерностей и специальных правил с исключениями.

**Фотоэлектричество.** Явление это заключается в испускании телом электронов под влиянием поглощенного света. Можно считать окончательно установленным, что начальная скорость электронов, вызванная светом определенного числа колебаний, абсолютно не зависит от силы света, но зато в общем возрастает с числом колебаний света (возможно, хотя и не установлено, существование частичных максимумов). Величина скорости такова, что начальная энергия фотоэлектрона несколько меньше энергии одного атома излучения:

$$\frac{1}{2} m v^2 = e V < h \nu.$$

Все эти законы непосредственно вытекают из представления о том, что каждый электрон получил свою энергию от одного атома излучения.

Часть кинетической энергии электрон должен потерять при прохождении сквозь поверхностный слой металла благодаря контактной разности потенциалов. Поэтому если энергия одного атома  $h\nu$  меньше, чем работа при прохождении контактного слоя, то испускания электронов не будет. И, действительно, чем электроположительнее металл, тем меньше та предельная частота  $\nu$ , при которой свет уже вызывает фотоэлектрический эффект.

Те же законы можно объяснить и особым свойством внутриатомных сил. Электрон, резонирующий на данное  $\nu$ , отрывается или с той скоростью, какую он имел внутри атома, или же тогда, когда достигнутая им под влиянием света скорость превзойдет определенную величину. Однако те внутриатомные скорости, которые проявляются в радиоактивных процессах, измеряются десятками тысяч вольт, тогда как фотоэлектроны дают 1—4 в.\*

Весьма важно также, что и те электроны, которые вызываются рентгеновскими лучами, подчиняются тем же основным законам. И здесь чем меньше период (продолжительность) рентгеновского импульса, тем больше скорости вызванных им электронов, тогда как от интенсивности лучей скорость не зависит. Величина скорости также находится в хорошем согласии с требованиями атомной теории.

На вторичных лучах особенно резко видно одно свойство данного явления, которое одинаково, впрочем, относится и к фотоэлектричеству, — свойство, трудно поддающееся объяснению без атомизации света. Неоднократно наблюдалось, что скорость вторичных электронов почти равна скорости тех первичных электронов, которые вызвали рентгеновский импульс. Трудно допустить, что выдергивание электрона вызывается большим числом последовательных импульсов, так как фазы их совершенно случайны. С другой стороны, импульс, распространяясь по шаровым поверхностям все большего радиуса, может передать в месте встречи с резонатором лишь малую часть всей своей энергии. Остается еще одно маловероятное допущение, что энергия вторичных лучей получена за счет внутриатомных радиоактивных процессов, а не рентгеновского импульса. Атомная теория, наоборот, предполагает, что порция энергии, излученная одним электроном, достигает другого электрона и поглощается им целиком. С другой стороны, однако, Зоммерфельд показал, что последовательное развитие электромагнитной теории приводит в случае рентгеновского импульса к чрезвычайно неравномерному распределению энергии: почти вся она сконцентрирована

---

\* Скорости электронов можно измерять той разностью потенциалов, которая может сообщить эту скорость или же остановить электрон, летящий с этой скоростью.

в узком конусе. Зоммерфельд смог даже показать, что при некоторых предположениях энергия импульса пропорциональна его продолжительности  $\tau$  (которая играет роль  $\nu$ ) и коэффициент пропорциональности близок к универсальной постоянной  $h$ .

**Фотохимия.** Эта область гораздо менее изучена; однако то, что здесь известно, говорит в пользу атомной теории.

Мы будем ожидать, что увеличение энергии одной молекулы при перегруппировке не должно превышать энергии атома излучения. Поэтому не всякий поглощенный свет может производить фотохимические действия, а только обладающий достаточно большим числом колебаний, по преимуществу ультрафиолетовый. От силы света эта предельная длина волны не должна зависеть. Если данная длина волны смещает термодинамическое равновесие системы, то она будет способна на это и при ослаблении света; наоборот, если данный свет (например, красный) не смещает равновесия при малой интенсивности, то и при усилении силы света в сотни раз он оказывается неспособным сместить его.

Как порядок величины молекулярной энергии при фотохимических процессах, так и роль цветности (числа колебаний) находятся в согласии с требованиями атомной теории.

Такое же хорошее согласие с теорией обнаруживают и те данные, которые имеются об ионизации газов ультрафиолетовым светом и об испускании электронов при химических реакциях. Здесь можно даже говорить о количественном подтверждении выводов атомной теории.

**Флюоресценция и фосфоресценция.** Эти явления заключаются в поглощении света одной частоты и испускании света других частот. Исследования Ленарда указали на тесную связь этих явлений с фотоэлектричеством. Поскольку явление зависит от свойств света, нужно было бы ожидать, что молекула, поглотившая атом излучения данной частоты, будет излучать свет меньшей частоты, обладающий меньшей энергией, т. е. свет испускаемый обладает большей длиной волны, чем свет возбуждающий. А это и есть так называемое правило Стокса, подтвержденное в громадном числе случаев.

Известны, однако, несомненные исключения из этого правила: 1) в свете флюоресценции встречаются и более короткие длины волн, чем возбуждающие; 2) если возбуждающий свет лежит в полосе поглощения, соответствующей и свету флюоресценции, то внутри той же полосы можно пользоваться и более длинными и более короткими волнами для возбуждения флюоресценции.

Легко, однако, видеть, что подобные исключения не противоречат атомной теории: 1) правило Стокса можно относить к средней частоте возбуждающего и возбужденного света, а не к отдельным составляющим колебаниям; 2) возможны случаи, когда поглощаются два атома излучения, в особенности при слабом

тепловом движении (низких температурах). Во всяком случае флюоресценция, противоречащая правилу Стокса, встречается редко. Для фосфоресценции и такие исключения неизвестны.

При флюоресценции интенсивность света не оказывает никакого влияния на появление или отсутствие эффекта. Только сила света флюоресценции связана с силой возбуждающего света.

И в этой области давно уже подмеченные закономерности вполне естественно вытекают из атомной гипотезы света, тогда как соответственного механизма пока придумать не удалось. Возможно, что флюоресценция и фосфоресценция могут быть объяснены при помощи фотоэлектричества; однако и в этой последней области механизм объясняет лишь очень немногие стороны явления.

Явление флюоресценции в области рентгеновских лучей (вторичные рентгеновские лучи) вполне подчиняется правилу Стокса.

Закатодные лучи. Наблюдая спектр закатодных лучей, движущихся по направлению к щели спектрографа, Штарк заметил, что кроме обычной линии, соответствующей данному газу, рядом появилась вторая линия большей частоты, как это и следовало ожидать на основании принципа Доплера. По отклонению этой «движущейся» линии, т. е. линии, вызванной движущимися частичками, от «покоящейся» можно судить о скорости движения частички. Опыт показал, что в закатодных лучах светят только частички, покоящиеся или движущиеся со скоростью, большей некоторой предельной скорости. С другой стороны, по-видимому, эта предельная скорость тем значительнее, чем больше частота света, так что кинетическая энергия светящихся частиц растет пропорционально  $h\nu$ . Кроме этих частиц, преобладают, по Штарку, частицы с энергиями  $2 h\nu$  и  $3 h\nu$ .

Это явление, хотя и дает, по-видимому, наилучшее согласие с атомной теорией, на самом деле, однако, может быть связано с ней лишь добавочным допущением, что энергия излучения и кинетическая энергия молекулы связаны простым соотношением (например, при ударе закатодной частицы о молекулу половина энергии переходит в колебательную, а вторая половина в кинетическую).

Теплоемкость твердых тел при низких температурах.\* Наиболее блестящее, но и наиболее неожиданное подтверждение получила атомная теория света в наблюдениях Нернста над теплоемкостями тел при низких температурах. Рассматривая твердое тело при достаточно низких температурах как систему резонаторов, кинетической энергией которых можно пренебречь по сравнению с колебательной, и распространяя на молекулы тела гипотезу атомного излучения, Эйнштейн заключил,

\* Ср: Назарев П. П. Вопросы физики. 6, 9, 1912

что теплоемкость должна быстро падать при приближении к абсолютному нулю, и дал формулу для этой зависимости, которая оказалась в неожиданном согласии с опытом. Допущение двух родов резонаторов уже оказывается достаточным и для количественного совпадения с опытными данными.

Замечательно, что то число колебаний, которое входит в формулу Эйнштейна для теплоемкости, совпало во всех случаях с числами, вычисленными Линдеманом на основании совершенно других данных.

Каммерлинг-Оннес показал, что его новые наблюдения над падением сопротивления чистых металлов при очень низких температурах находятся в полном согласии с гипотезой Эйнштейна.

Такое же неожиданное согласие обнаруживает и недавно открытое Хабером явление испускания электронов при химических реакциях.

Таким образом, гипотеза об атомах света оказалась чрезвычайно плодотворной и в области чисто молекулярных и тепловых явлений, что указывает на существование более глубокой и общей основы данной гипотезы, чем те явления, которые ее впервые вызвали.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Атомная гипотеза лучистой энергии возникла как выход из того противоречия, к которому привела электромагнитная теория в связи со статистическими представлениями о тепловом равновесии. Для разрешения этого противоречия, очевидно, нельзя пожертвовать электромагнитной теорией; но в настоящее время, когда статистическая механика получила столь наглядное подтверждение в броуновском молекулярном движении, в излучении  $\alpha$ -частичек радием, в испускании электронов раскаленными телами, невозможно отказаться и от применения теории вероятностей. Оказывается, однако, что обе эти теории приводят к самому полному согласию с опытом, если выдвинуть новую гипотезу.

Эта гипотеза вводит новую универсальную величину — атом излучения, который, однако, оказывается по своим свойствам вполне аналогичным атомам материи и атомам электричества, успевшим уже завоевать прочное место в системе описания природы.

Та же гипотеза, примененная к другим проявлениям лучистой энергии, приводит к ряду закономерностей, давно уже установленных в этих областях в качестве эмпирических правил. Даже применение ее к тепловым колебаниям молекул в твердом теле, предшествовавшее опыту, предсказало его с неожиданной правильностью.

Этого во всяком случае достаточно, чтобы уделять этой гипотезе серьезное внимание и признать в ней новое важное обогащение наших теоретических представлений.

В то же время надо сознаться, что атомная гипотеза сама еще никакого объяснения не имеет, что она не имеет даже конкретной, хотя и произвольной, формы, что не выяснено, удастся ли ее согласовать с хорошо изученными фактами волновой оптики, что она вообще создает больше вопросов, чем дает ответов.

Тем больше оснований заняться ее проверкой и развитием — выделить из нее то здоровое зерно, которое в ней несомненно имеется, установить границы ее применимости и придать ей то или другое конкретное содержание.

Статья опубликована в журнале «Вопросы физики», 6, вып. 2, с. 35—50, 1912. Этот журнал выходил в качестве приложения к ЖРФХО (ч. физ.). Статья посвящена проблемам теории излучения и в отечественной литературе является едва ли не первым популярным обзором по квантовой теории; содержит ряд важных идей самого А. Ф. Иоффе, опубликованных им в 1910 г. (см. статью в ЖРФХО, ч. физ., 42, 409, 1910; Избр. тр., т. II, с. 9).

Она возвращает нас к эпохе, когда у теории квантов света было сравнительно немного приверженцев. А. Ф. Иоффе относился к их числу. Рядом своих оригинальных статей 1907—1910 гг. он продемонстрировал плодотворность квантовых представлений. Надо напомнить, что ко времени выхода в свет настоящего обзора А. Ф. Иоффе работа Н. Бора по квантовой теории атома (модель Резерфорда—Бора) еще не была выполнена.

## НОВЫЕ ПУТИ НАУЧНОЙ МЫСЛИ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ

Физика в настоящее время переживает свой героический период; каждый год приносит целый поток новых фактов и идей, опережающих самые смелые наши ожидания.

Со стороны людей, интересующимся успехами физики, этот бурный период должен представляться полным внутренних противоречий. Здесь и такие открытия, как рентгеновы лучи и радиоактивность, непосредственное наблюдение атомов и электронов, теплового движения, расположения атомов в кристалле, приближающих физику к английскому типу конкретных моделей. А наряду с этим на немецкой почве вырастают статистическая термодинамика с чисто схоластической теорией квант и принцип относительности, который не только искажает пространство и время, но и лишает их самостоятельного существования и предлагает отказаться от геометрии Эвклида. Наконец, появляется модель атома Бора, которая сочетает в себе все эти элементы; модель, построенная по образцу солнечной системы из электронов, но движущихся по законам относительности, и каким-то таинственным образом освобожденная теорией квантов от излучения. И эта модель, которая не есть даже модель, так как она заключает в себе элементы еще более абстрактные, чем те, которые должна объяснить, заполочила всю физику.

Всякий помнит физику XIX в. с ее непреложными и непрерывными законами природы, выражаемыми законами термодинамики и уравнениями Максвелла, с механической картиной



мира, построенной на материи и эфире. И вот перед нами физика, в которой нет невозможного, а есть только более или менее вероятное, нет эфира. Раньше говорили, природа не знает скачков, теперь — все наоборот: и вещество, и электричество, и самая вероятность полны прерывностей.

И этот хаотический поток не остается в указанных ему берегах физики, он разливается широко по окрестности и грозит подорвать прочно заложенные здания соседних областей: у химии он отнимает устойчивость, непревращаемость элементов и предлагает новую модель атома, молекулы, валентности и т. д. У механики подрывает постоянство массы, параллелограмм скоростей. У кристаллографии разрушает идею элементарного кристаллического индивидуума и заменяет его атомными решетками. У геометрии оспаривает евклидово пространство и заменяет его иным, зависящим от тяготения. В гносеологии утверждением реальности атома и электрона нарушает добрый старый мир, заключенный на почве феноменологии и разрешения использования рабочих гипотез. Наконец, можно сказать, физика подрывает и основы самого здравого смысла теориями относительности и квантов.

Поэтому вопрос о том, что же происходит в физике и чем руководствуются физики, принимая новые странные теории и отбрасывая старые, столь прочно, казалось, обоснованные, — этот вопрос приобретает общий интерес для современной науки и, следовательно, неразрывно с ней связанной техники.

К сожалению, недостаток времени не позволяет мне исчерпывающим образом ответить на эти два вопроса и я принужден буду скорее назвать, чем излагать, важнейшие этапы научной мысли, противопоставляя новые взгляды прежним, а на вопрос о мотивах — дать самый тривиальный ответ, знакомый еще со времен Бэкона, а именно: «Опыт — это высший критерий, заставляющий принимать или отбрасывать теории».

Позвольте же проследить важнейшие этапы в развитии физики за 20 лет нашего столетия.

Первый этап — переход от термодинамики к статистике. Еще в 1873 г. Больцман дал статистическую теорию второго начала, но она, как и работа Карно, пролежала под спудом 30 лет в стороне от хода научной мысли, увлеченной успехами классической термодинамики в теории растворов, физической химии, тепловой техники и т. д.

Потеряв надежду убедить в своей правоте, Больцман повесился в 1906 г., когда изучение броунова движения, а затем позднее электронов, вылетающих из металлов, радиоактивного распада с полной убедительностью доказало статистический характер второго начала. Все возможно, и все возможности действительно осуществляются, но только одних больше — они попадают нам чаще на глаза, других меньше — их мы не встречаем. Вот простой смысл второго начала, лишенный того мистического элемента целесообразности, который в нем сквозил.

Интерес переносится от суммарных законов термодинамики к элементарным явлениям, их обуславливающим. Отсюда следующий этап — победа атомизма.

Двадцать с лишним веков физика подходила к атому и наконец обнаружила его. Древний спор, начатый еще Демокритом, закончен. Вместе с атомом установлен электрон и намечен магнетон. Уже открыто строение кристалла. Мы накануне возможности получения объективного расположения атомов в молекуле и электронов в атоме. Уже намечены пути к проникновению и далее в глубь атомного ядра, скрывающего его массу и химическую индивидуальность. Периодическая таблица Менделеева получила ясный и простой смысл.

Третий важный шаг — это переход от непрерывной статистики Больцмана к теории квантов Планка. Важнейший результат Больцмана — это закон равномерного распределения энергии по всем степеням свободы при тепловом равновесии. Этот закон натолкнулся на резкое противоречие в вопросе излучения. Лучистая энергия со своим бесконечным числом различных колебаний должна бы высосать всю энергию из материи, заключающей конечное число атомов, а между тем на опыте устанавливается вполне определенное равновесное излучение. Чтобы выйти из этого затруднения, Планк принял и для вероятности прерывное строение, разбил все колебания по категориям, так что наиболее быстрые колебания оказались почти лишенными энергии. Этим было не только устранено противоречие, но и самый закон распределения энергии между различными колебаниями с поразительной точностью совпал с опытом. Сначала это был удачный математический трюк, но затем удалось показать, что свет действительно сообщает и получает от электронов как раз те порции энергии, которые были постулированы Планком.

Можно было думать, что здесь сказываются особые свойства эфира, но в 1907 г. Эйнштейн применил тот же принцип к тепловым колебаниям твердых тел и сразу предсказал найденное вслед затем школой Нернста исчезновение теплоемкости с приближением к абсолютному нулю. Стоило несколько точнее сформулировать мысль Эйнштейна, и выяснилось, что тепловое движение твердого тела — это его упругие колебания, вытекающие в свою очередь из свойственной ему кристаллической решетки. Оказалось, что упругие постоянные тела вполне определяют все его тепловые свойства, а вместе с тем и все его физико-химические свойства. Создалась упругостная теория тепла, объединяющая и объясняющая структуру, упругость, звук, теплоту и химическое сродство тела, — теория не менее важная, хотя и менее известная, чем электромагнитная теория света.

Почин Эйнштейна был распространен и далее: куда ни вошли кванты, они сразу устраняли накопившиеся противоречия с опытом и правильно предсказывали новые законы. Кванты сделались каким-то философским камнем, а в то же время все по-

пытка объяснить их терпели неудачу, смысл их и сейчас так же темел.

Наконец, в 1913 г. Бор ввел кванты как готовый рецепт в модель атома и сразу же объяснил не только спектр водорода и гелия, но и самые тонкие его детали. Рентгеновы спектры, хотя и не с точностью до 1%, но зато на всем протяжении периодической системы совпали с предсказаниями теории. И остальные спектры в гипотезе Д. С. Рождественского получили простое толкование. Ионизация, поглощение, радиоактивность с поразительной точностью подтверждают модель Бора. Точный расчет этой модели представляет еще большие трудности, но во всех областях физики она служит руководящей нитью научного исследования.

Учение об электричестве проделало за это время такую же эволюцию. Под влиянием открытия рентгеновых лучей и исследований кембриджской школы Д. Д. Томсона над ионизацией газов взор физиков, очарованный картиной электромагнитного поля, принужден был обратиться к его источникам — электрическим зарядам. И здесь было установлено атомистическое строение электричества, доказано существование электрона — основного камня мироздания. Электронная теория, не разрушая уравнений Максвелла, дала им только иное толкование, но зато она лишила эфир его индивидуальности. Остался один универсальный эфир и универсальные в нем электроны. Электроны, оказалось, обладают основным признаком вещества — инерцией; такой же инерцией обладает и электромагнитная энергия. Отсюда не трудно было перейти и к утверждению, что и всякая иная инерция электромагнитного происхождения. Выяснив принципиальную невозможность свести электромагнетизм к законам механики, физика обернула задачу, и ей удалось обосновать механику электродинамикой. От механической картины мира, которая представлялась идеалом в XIX в., мы перешли к электромагнитной картине, охватывающей все явления природы. В этой картине основной элемент прежнего мира — масса — получил совершенно второстепенный характер одной из производных, зависящих и от скорости, и от условий дифференцирования. Ее значение не больше тепломкости в учении о теплоте.

Наконец, исчез последний оплот механического мировоззрения — эфир, когда выяснилось, что все тела, с одной стороны, не захватывают его в своем движении и в то же время не обнаруживают и своего перемещения относительно эфира. Лишившись всех своих конкретных свойств, эфир лишился и реальности в принципе относительности. Невозможность заметить движение тела по отношению к эфиру — факт, и притом один из наиболее твердо установленных фактов. Поэтому вместо того чтобы придумывать ему объяснения, Эйнштейн и предложил исходить из него и приписать природе все те свойства, которые отсюда вытекают. При этом оказалось, что все наши привычки страдают

самым жестоким образом, но ни в себе самом, ни в применении к другим явлениям этот принцип не приводит к противоречиям, наоборот, он с полной точностью выражает зависимость массы от скорости.

Наиболее изящное и адекватное выражение принципу относительности придал Минковский. Мнимое время, умноженное на скорость света, — совершенно эквивалентно любой координате пространства. Все наши явления протекают в этом четырехмерном и притом совершенно изотропном пространстве.

Этот частный принцип относительности справедлив только для одного вида движений — для равномерного и поступательного. Ускорение нельзя игнорировать. Мы его замечаем и приписываем тяготению, так как ведь в данном поле тяготения все тела обладают одинаковым ускорением. Инертная масса и масса тяготения совпадают. Мы можем поэтому с одинаковым правом говорить об ускорении или о тяготении. Подобное же рассуждение применимо и к центробежной силе. Если нет эфира, то чем может отличаться вращающаяся координатная система от неподвижной? По отношению к чему она вращается?

Оказалось, что все эти трудности устраняются, если четырехмерному пространству приписать особую геометрию, по которой квадрат элемента длины не равен сумме квадратов составляющих, а равен некой квадратичной форме, коэффициенты которой определяют поле тяготения.

Так в круг электродинамики было вовлечено и тяготение, со времен Ньютона оставшееся неразрешимой загадкой. И эта теория сразу устранила те недочеты, которые сохранялись в теории Ньютона, и предсказала искривление светового луча при прохождении мимо Солнца, обнаруженное, по-видимому, этой осенью.

Но зато этот обобщенный принцип относительности ставит нас перед альтернативой: либо признать, что привычные нам простые законы протекают в неевклидовом мире, либо допустить такое искажение всех тел и законов, которое приводит к тем же результатам.

Итак, я резюмирую важнейшие изменения: вместо законов термодинамики — игра случайностей; вместо непрерывности — атомы, электроны, магнетоны и кванты; вместо механики — электродинамика; вместо эфира — пространство, да еще неевклидово. Объединены новые области в упругостной теории тепла, в теории тяготения и в особенности в модели атома.

Отчего произошла эта революция в науке, имеющей ведь хорошие традиции? Быть может, покажется парадоксальным, а между тем довольно близко к истине, если я отвечу: оттого, что усовершенствовались методы наблюдений и техника эксперимента. Если раньше микроскоп ставил предел нашему любопытству в длине волны света  $10^{-5}$  см, то теперь рентгеновы лучи раздвинули этот предел до  $10^{-8}$  см. Если раньше скорость пули ( $10^5$  см/сек.) являлась пределом измеримых скоростей, то теперь

для электронов этот предел почти дошел до скорости света. Если раньше мы измеряли время до  $10^{-4}$  сек., то теперь электромагнитные колебания опускают этот предел до  $10^{-10}$  сек.; измерение массы с  $10^{-6}$  г дошло до  $10^{-13}$  г, а температура с  $80^\circ$  абс. — до  $4.1^\circ$  абс. Открылись новые области явлений, мы попали в мир новых масштабов, подобно Гулливеру, и неудивительно, что для них потребовались и новые теории. Ведь мы, в отличие от Свифта, не по фантазии и аналогии строим картины этих новых миров, а под строгим контролем опыта, и наши теории должны быть орудиями, которые позволят нам оперировать с реальными карликами и великанами, тогда как раньше оперировали себе подобными.

Поневоле произошел сдвиг и в психологии физиков. Мы перестали доверять так называемому здравому смыслу, когда он заводил нас в тупик противоречий; но ведь часто мы называем здравым смыслом только концентрированный опыт, накопленный в рамках прежних масштабов, а к новым масштабам наши представления применимы только путем экстраполяции; мы охотно готовы испытать всякую теорию, если она освещает нам путь и устраняет препятствия. Ведь и утверждения Коперника, Галилея и Колумба, как казалось современникам, противоречили здравому смыслу, тем не менее мы к ним привыкли. Мы надеемся привыкнуть и к новой геометрии, если она, как обещает, объяснит нам электродинамику и тяготение. От теории мы требуем правильного предсказания опыта и отсутствия внутренних логических противоречий. Мы верим, что наш мир и наша логика не противоречат друг другу, что объяснение природы возможно. И к счастью, надо сказать, что эта единственная наша вера не пострадала в круговороте новых идей и фактов.

Вот объяснение и оправдание происшедшего в физике переворота. Остается, однако, вопрос, как сочетаются столь разнородные элементы в одном мировоззрении и не потеряли ли мы цельной картины мира в беспринципной погоне за новыми теориями, руководствуясь принципом «успех оправдывает средства».

Нет, мне кажется, наоборот, современную картину следует признать более цельной. Раньше мы довольствовались теориями, обобщающими одну группу явлений, и сознательно закрывали глаза на другие. Так, рядом с термодинамикой существовала кинетическая теория газов, рядом с теорией Максвелла — явления электролиза и ионизации газов. Теперь мы требуем, чтобы вся совокупность известного охватывалась гипотезой, не допускаем ни одного противоречия. Мы готовы лучше примириться с неевклидовой геометрией, чем с ошибкой в 5-м знаке. И, в сущности, новые радикальные принципы на деле сводятся к поправке в этом знаке.

Правда, наряду с конкретными моделями мы пользуемся и самыми абстрактными обобщениями, как например теорией квантов, но мы утешаем себя надеждой, что со временем, на-

учившись применять кванты, научимся и понимать их. Кванты — это яйцо с сюрпризом: со временем мы узнаем его содержание, а пока вносим его в нашу картину как оно есть — в оболочке. Картина состоит из неравноценных элементов: одни части вскрыты до электрона, другие (ядро и кванты) существуют еще в запечатанном виде. И все же это части одного мировоззрения. Мистицизм и антропоморфизм изгнаны из своих прочнейших убежищ. В десятки тысяч раз раздвинутые рамки нашего опыта охватываются одной электромагнитной теорией, одинаково справедливой и в глубине атома, и на просторе вселенной.

Мы не ставим заранее границ доступного нам мира, стремимся познать все существующее, как бы глубоки ни были его корни. Порвав с феноменологическим пессимизмом, предостережения которого провалились, современная физика полна веры в реальность мира и его доступность нашему анализу. И эта вера — лучшая предпосылка движения вперед. Пусть некоторые пути, проложенные последним десятилетием, и не приведут к цели, но на них обнаружено немало ценного и, бодро подымаясь по ним, можно будет рассмотреть и новые неведомые еще нам пути.

Физика не потому строит гипотезы, что она не знает гносеологии, а потому что выработанные ею гипотезы оказались плодотворнее сухой почвы скептицизма. Выше всего — опыт. И он оправдывает бодрый оптимизм современной физики.

Статья опубликована в сб.: Научно-технический вестник, т. I, № 3, с. 1—3, 1921.

## НЕПРЕРЫВНОЕ И АТОМНОЕ СТРОЕНИЕ МАТЕРИИ

История вопроса о структуре вещества — одна из наиболее наглядных иллюстраций марксистской концепции науки. В настоящей статье я попытаюсь сопоставить моменты, характеризующие диалектический и исторический путь развития наших представлений о материи.

Что является прообразом материи: вода или песок? Так ставил вопрос греческие мыслители. Когда мы рассматриваем стекло, камень, металл, они представляются нам сплошь заполняющими занимаемый ими объем. Взаимная непроницаемость, однородность, сплошность — основные свойства той части пространства, которая занята материей. Непрерывность материи — исходный принцип миропонимания. На нем построен и математический анализ явлений природы — дифференциальное исчисление. Гидродинамика и теория упругости, развитые на протяжении XVIII и XIX вв., дали стройную теорию сплошности твердого и жидкого тела. По их образцу построены теория звуковых, световых и электромагнитных волн, теория электричества и магнетизма. К концу XIX в. физика материи и физика эфира пред-

ставлялись как теории, описывающие непрерывно заполненное пространство, способное сжиматься в одних местах и расширяться в других, вызывая движение и взаимодействие отдельных своих частей. Идея непрерывности и эволюции нашла свое выражение в известном изречении: «Природа не знает скачков».

Оставались, однако, области, где упорно держались атомные представления — это учение о газах и химия. Бернулли и Ломоносов еще в XVIII в. объяснили, исходя из представления о газе как о совокупности движущихся частиц, основные законы влияния давления и температуры на объем газа.

Действительно, в противоположность твердым телам газы обнаруживают величайшую взаимную проницаемость, делимость, непонятные с точки зрения сплошности материи. Во второй половине XIX столетия кинетическая теория газов получила широкое развитие в трудах Максвелла и Больцмана, но она не оказала большого влияния на физику в целом. Здесь до такой степени господствовало упругое сплошное тело и феноменологическая энергетика, что наиболее последовательный представитель атомизма Больцман в припадке меланхолии повесился в 1906 г., когда его идеи были уже близки к победе.

Первая четверть XX столетия, наоборот, — эпоха безраздельного господства атомизма. Теория броуновского движения Эйнштейна в 1905 г. и ее блестящее подтверждение Перреном в 1907 г., открытие в 1895 г. рентгеновых лучей, привлечение внимания к прохождению электричества через разреженные газы за счет движения электронов и ионов; электролиз, радиоактивные лучи — все это дало столько доказательств атомной природы материи, что сомнений в ее зернистости не оставалось. Радиоактивное вещество испускает альфа-частички, каждую из которых мы можем отметить по вспышке, вызываемой ею при ударе о флюоресцирующий экран, по разряду, вызываемому в счетчике Гейгера, по тому следу из водяных капелек, который она оставляет, проходя сквозь пересыщенный водяными парами газ. Эти же альфа-частички, пройдя сквозь тонкое стекло запаянной трубки, создают в нем газ — гелий, который известен и в жидком и в твердом состоянии. Можно ли еще сомневаться в том, что этот гелий состоит из тех частичек-атомов, из которых он был получен, или что радиоактивное вещество заключает в себе те частички, которые выбрасывает? Все показания сходятся: более 20 способов определения числа атомов в теле приводят к совпадающим результатам — в  $1 \text{ см}^3$  воздуха при нормальном давлении находятся  $2.7 \cdot 10^{19}$  молекул.

В 1912 г. открытие Лауэ завершило окончательную победу атомизма. В типичном сплошном твердом теле — кристалле — рентгеновы лучи обнаружили периодическую атомную структуру. Мы не только знаем теперь, сколько атомов в теле, но и непосредственно видим их расположение. Итак, все тела состоят из атомов.

Но что такое атом? К тому времени, когда он завоевал себе признание, он потерял уже прежнее содержание: неделимого последнего элемента строения вещества. Из любого тела могут быть выделены электроны; радиоактивные атомы испускают электроны и альфа-частички. И вот в 1912—1913 гг. ставится и разрешается новая проблема строения самого атома. Модель Резерфорда и Бора рисует атом как подобие солнечной системы: положительное тяжелое ядро и вращающиеся вокруг него электроны. Мы знаем, какими зарядами они обладают, и знаем их массу, а это синоним энергии. Значит, можно определить степень концентрации заряда в электроне и в ядре, которая придавала бы им тот запас энергии, который проявляется в их массе.

Электрон должен иметь размер порядка  $2 \cdot 10^{-13}$  см, а ядра различных атомов — от  $10^{-16}$  у водорода до  $10^{-12}$  у более тяжелых элементов. Весь же атом в целом имеет размер около  $10^{-8}$  см. Ядро и несколько десятков окружающих его электронов занимают лишь ничтожные участки объема, предоставленного атому, —  $10^{-5}$  частей по размерам и  $10^{-15}$  по объему. Итак, атом — пустота, в которой на громадных расстояниях движутся мелкие частицы. Чистый горный воздух гораздо больше заполнен твердыми частицами пыли, чем самое плотное тело веществом — ядрами и электронами.

Казалось, атомизм победил окончательно. Сплошность вытекала из грубости наших методов наблюдения природы. Более тонкие орудия измерения разбили сплошное тело на атомы и атомы на электроны и протоны, связанные между собою лишь силовыми полями и динамическими взаимодействиями. Какой-нибудь синтез сплошности и прерывности, примирение этих двух концепций вещества казались невозможными, как раньше на основе теории Максвелла, казалось; окончательно утвердилась теория непрерывного электромагнитного поля. И все же за последние 5 лет волновая теория материи, квантовая механика пришли к действительному синтезу. Жесткие границы электрона-шарика исчезли: электрон, как и протон, расплылся в непрерывно сходящую на нет пульсирующую бесформенную массу. Резкая индивидуальность каждого электрона сменилась рассмотрением атомной системы или даже целого кристалла как целого. Проследить путь отдельного электрона, определить его принадлежность в данный момент к тому или другому атомному ядру невозможно. В молекуле валентные электроны сплошным облаком охватывают и связывают отдельные атомы. Пустоты, строго говоря, нет ни внутри тел, ни даже между телами. С одной стороны, это такая сплошность, о которой не мечтали ни во времена греков, ни в XIX в. С другой стороны, мы имеем атомную картину мира, простирающуюся в глубь атомного ядра.

То же противоречие сплошности и атомности определило историю учения о свете. Вопрос о том, исходит ли свет первично из



глаза или из наблюдаемого предмета, сменился вопросом о строении светового луча. По Ньютону, это поток корпускул, выбрасываемых светящимся телом, по Гюйгенсу, — распространение упругих волн. Больше столетия авторитет Ньютона поддерживал атомистическую концепцию света. Открытия начала XIX в., казалось, окончательно уничтожили атомизм в учении о свете и свели его к поперечным волнам в эфире, а во второй половине XIX в. — к электромагнитным волнам в сплошной среде. Электромагнитная теория света Максвелла была полным триумфом волновой теории света — теории сплошности.

С самого начала XX в. стали, однако, вновь появляться признаки атомной структуры света. Их выдвинул тот же Эйнштейн в 1905 г. Одновременно со своей теорией относительности он лишил реального содержания мировой эфир как среду для распространения световых волн. И я пытался тогда создать теорию излучения, состоящего из отдельных квант — фотонов.

Однако подобно тому, как волновая теория света не могла объяснить явлений испускания и поглощения (фотоэффекта, фотохимии, свечения), где проявляется атомность света, так и теория фотонов не в силах была охватить распространение света (интерференцию, дифракцию, дисперсию). Психологически положение было иным, чем в вопросе о структуре материи. Там была победа атомизма, здесь — неразрешимое противоречие противоположных свойств света. Глубочайшие мыслители, не привыкшие, однако, к диалектическому методу мышления, рассматривали это противоречие как тупик, как позорный провал науки. Создатель электронной теории Лоренц, формулируя безвыходность положения, мог только пожалеть, что он не умер раньше, чем оно выявилось во всей силе.

А между тем отчаявшийся Больцман проглядел уже подготовленную победу его идей. Он умер, когда уже развивалась теория квантов, а в 1905 г. было раскрыто молекулярное движение. В том же 1924 г., когда Лоренц считал теоретическую физику зашедшей в тупик, была представлена диссертация де Бройля, формулировавшая волновую механику, а в следующем году Гейзенберг дал новую форму квантовой механики. Противоречие, обострившееся до пределов, привело к синтезу новой квантовой механики, где поглощение и испускание света определенными порциями не противоречит, а, наоборот, вытекает из периодического, волнового характера света.

Еще более замечательно, что противоречивые свойства света и противоречивые свойства вещества слились в одном общем синтезе. Одинаково объяснились в этом новом понимании и движение тела, и луч света. Очень удачно, но далеко не случайно, что опыт вплотную подошел к теории и подкрепил ее. В дифракции электронов, протонов и тяжелых атомов мы наглядно видим волновую природу движения материи, а в космических лучах с такой наглядностью проявилась атомная теория света, что

долго нельзя было даже найти критерий, чтобы отличить поток частичек от потока фотонов.

Едва достигнув этого синтеза, мы уже с его высоты видим новые противоречия и уже ищем путей к новому синтезу. Эти пути ведут нас к атомному ядру — центральной проблеме физики ближайших лет. Наряду с этим предстоит еще громадная работа по освоению достигнутого синтеза, по использованию его для теории твердого и жидкого тела, для управления ходом химических процессов и т. п.

Оглядываясь назад, любопытно отметить, что электромагнитная теория света, которая в противоречии сплошности и атомности света представляла первую точку зрения, в свое время явилась синтезом, объединившим две существовавшие в то время противоположные теории света. Одна утверждала, что колебания в поляризованном луче света происходят в плоскости поляризации, другая считала, что колебания перпендикулярны к этой плоскости. Электромагнитная теория объединила эти, казалось бы, непримиримые противоречия. Колебания магнитного вектора лежат в плоскости поляризации, электрического — перпендикулярно к ней. Один вопрос был решен, встал новый.

Время Маркса было эпохой теорий непрерывности, время Ленина — периодом победы атомизма. Теория Маркса и Ленина, философия диалектического материализма, предвидела их неизбежный синтез, которого не могли видеть ни Больцман, ни Лоренц.

Не только дать цельную, лишенную противоречий картину уже известного, но и правильно предвидеть пути будущего — вернейший признак правильной теории. Этот признак для философии диалектического материализма целиком и полностью оправдывается на каждой новой ступени знания, на каждом новом этапе истории. В правильно подмеченные диалектические формы развития история вкладывает каждый раз новое содержание и новые черты. Только наполненная реальным содержанием в конкретных исторических условиях диалектическая трактовка дает теорию исторического процесса.

Другая еще более важная черта марксистской методологии — связь истории науки с социальными условиями, с развитием производительных сил. Какое отношение имеет тот или иной взгляд на строение материи и света к прогрессу техники? Ведь атомы, электроны и фотоны — это с точки зрения техники, имеющей дело с тоннами и киловаттами, комариная плесь, как выразился один из крупнейших русских инженеров-академиков.

Теория упругости и гидродинамика, ставшая основанием всех теорий сплошности, развились в стройную законченную систему под влиянием прямых запросов техники, постройки мостов, перекрытий зданий, гидравлических и оросительных сооружений. По многообразию отдельных приложений, по математическому аппарату эти области далеко обогнали в первой половине XIX в.

все остальные отрасли физики. Появление движущихся и вращающихся машин не вызвало вначале серьезных сдвигов в учении о веществе. Та же теория упругости с добавкой сил инерции годилась не только для статических систем, на которых она создавалась, но и для сравнительно медленно движущихся машин. Если и были недочеты, то они покрывались излишком металла, большими, нелепыми с современной точки зрения запасами прочности. Машины, вычисленные по классической теории упругости и усиленные «на всякий случай» сверх расчета, работали.

В таком же положении были и материалы электротехники. Для невысоких напряжений в несколько сот вольт и сотни перемен направления тока в секунду не приходилось ставить высоких требований ни к изоляции, ни к железу электрических машин. Изолятор можно было рассматривать, по Максвеллу, как сплошное тело с определенной диэлектрической постоянной. Если и наблюдались случаи, когда теория упругости или теория электромагнитного поля не оправдывали расчета, то они не привлекали внимания, их легко устраняли добавочной затратой материала. Они не делались источником углубленного научного исследования.

С начала XX в. положение резко изменилось. Появились быстро действующие машины, турбина Лаваля, делающая десятки тысяч оборотов в минуту вместо сотен, паровые турбины с громадными скоростями пара и вращения. Появилась авиация, которая поставила небывалые требования к экономии материала. Появилась радиотехника с искрой, дугой или электронными лампами как генераторами электромагнитной энергии и с числами колебаний, измеряемыми многими миллионами в секунду. Появились высоковольтные передачи, потребовавшие новой изоляции. Перед лицом этих новых требований старая физика и основанные на ней расчеты сопротивления материалов и электротехнических материалов оказались несостоятельными. После нескольких миллионов слабых ударов материал ломается, хотя он и способен был бы выдержать гораздо большие статические усилия, а при тысячах оборотов в минуту недолго и до миллиона ударов: через несколько дней хорошо рассчитанная по старым формулам деталь ломается от «усталости». Уже этот антропоморфный термин свидетельствует о несовершенстве физической теории. Здесь решающими являются не вычисленные по теории упругости усилия, а какие-то свойства структуры, которые вызывают «утомление». Этим свойствам не было места в рамках теории сплошности. Один из крупнейших специалистов в этой области, подводя в 1905 г. итог, признал, что приходится отказываться от всякой общей теории сопротивления материалов при быстрых и частых нагрузках, что приходится каждый кусок железа, используемый в машине, изучать отдельно. Очевидно, такое решение несовместимо с техникой массового производства. Понятен поэтому инте-

ресс, с которым техника отнеслась к атомной физике, раскрывшей механизм «утомления», «последствия», «пластичности», наклепа, разрушения. Изучение атомной структуры металлических кристаллов, механизма сдвигов и двойникования при течении материала, рентгеновских фотографий расположения (текстур) и строения кристалла, быстрое развитие учения о кристаллах в 20-х годах со многими сотнями работ — результат требований техники.

С другой стороны, и электротехника потребовала более детального проникновения в механизм явления. Изоляция, которая прекрасно выдерживает большие напряжения постоянного или переменного тока, пробивается при ничтожных напряжениях на большой частоте. На первый план выступают потери. А их нельзя учесть, не разобравшись во вращении диполей, в переносе и скоплении ионов. Атомной теории диэлектриков, как и атомной теории механических деформаций, посвящены тысячи работ, сильно продвинувших саму атомную теорию. Нельзя не видеть здесь результата настоятельных потребностей техники.

Новый период синтеза сплошности и атомности также имеет свою техническую базу, которая настойчиво движет вперед науку о строении вещества. Это — производство пластических масс и изоляции, выдвигающее новую задачу изучения стекол, полимеризирующихся тел, коллоидов, аморфных масс. Химическая промышленность, искусственный шелк, удобрения, интенсификация сельского хозяйства могут быть созданы и построены лишь на базе новых идей химической физики, внесенных волновой механикой. Изготовление специальных сталей, легких сплавов, котлов высокого давления требует изучения не только кристаллических элементов металла, но и связывающих их прослоек, пограничных и поверхностных явлений. Автоматизация, телевидение выдвигают наряду с металлами и изоляторами новые материалы — полупроводники. Современная техника наполняет физику новым содержанием, новыми материалами, к изучению которых ее подводит новая квантовая механика.

Таким образом, ясно видно, что даже в таком, казалось бы, чисто теоретическом вопросе, как существование и строение атома, наука не идет своими путями раскрытия истины вне истории, техники и производственных отношений общества, в котором она развивается. Наоборот, отдельные этапы научного развития глубоко переплетаются с историей техники и не могут быть поняты вне этой истории. Темпы и направления развития новых идей самым очевидным образом определяются потребностями общества и техники. Электризацией трением перестали интересоваться с появлением гальванических элементов, а изучение элементов было заброшено, когда появились электродвигатели. С научной точки зрения вопросы эти вовсе не потеряли интереса: они и сейчас еще не разрешены и весьма актуальны. Но технике они не нужны, и наука перестала ими заниматься. Дуга и искра были изучены и поняты, когда радиотехника вос-

пользовалась ими. Сейчас они оставлены, и так же интенсивно изучается тепловое излучение электронов и механизм фотоэффекта. Те же требования техники сейчас выдвинули полупроводники и свечение газов. Такими примерами полна история физики. Среди них борьба сплошности и прерывности на протяжении веков особенно наглядно иллюстрирует правильность диалектического и исторического метода Маркса—Ленина.

Статья опубликована в кн.: Памяти Карла Маркса. М.—Л., 1933. с. 247—253, выпуск которой был приурочен к 50-летию со дня смерти К. Маркса.

## ТВЕРДОЕ ТЕЛО КАК ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Представление о внутреннем строении окружающих нас тел испытало резкие изменения. Уже первые наблюдения над способностью тел сокращаться при сжатии и расширяться при нагревании заставили подозревать, что при всей видимой сплошности и взаимной непроницаемости тела построены из мельчайших неделимых частиц — атомов, сближение или удаление которых друг от друга и вызывает видимое изменение размеров тела. Естественно, что атомная картина получила развитие прежде всего в применении к газам, которые особенно легко и сильно меняют свой объем. Кинетическая теория газов в точной количественной форме была уже развита в XVIII в. Бернулли и Ломоносовым. С тех пор газы всегда служили областью наиболее успешного применения атомных представлений. На газах эти представления оформились в теорию, которая постепенно стремилась охватить и жидкое и твердое состояния.

Наоборот, представление о сплошном заполнении пространства лучше всего применимо к наиболее плотному твердому состоянию. И действительно, на протяжении всего XIX в. все теории, стремившиеся объяснить свойства твердых тел, исходили из картины сплошности. Таковы теория упругости, теория оптических и электрических явлений. Для общности, зная, что твердое тело может переходить в газ и получаться конденсацией газа, они не отрицали присутствия атомов и в твердых телах, однако там они остались бесполезной гипотезой еще 150 лет после создания кинетической теории газов. Дюбуа-Реймон, близорукий философ-натуралист XIX в., объявил решение вопроса о сплошности или атомности навсегда недоступным человеческому уму. Энергетическая школа Оствальда считала возможным устранить самый вопрос об атоме, пользуясь одними формальными закономерностями. Непонимание значения атомных представлений, доведшее до самоубийства гениального творца атомной статистической физики Больцмана, в значительной степени обязано тому, что свойства газов перестали привлекать интерес ученых, увлеченных новыми перспективами термодинамики и электродинамики.

1906 г. — год смерти Больцмана — был началом победы его идей, победы, еще недавно казавшейся окончательной. В самом деле, теория броунова молекулярного теплового движения, созданная Эйнштейном, в опытах Перрена непосредственно свидетельствовала о тепловом движении атомов и определяла их размеры. Вильсон наглядно обнаружил путь отдельного атома гелия, пропуская альфа-лучи радиоактивных тел через пересыщенный водяной пар, а Рамзай показал, что, собрав эти альфа-лучи, мы получаем известный газ гелий. Каммерлинг-Оннес перевел гелий в жидкое состояние, а Кеезом — в твердое. Этот твердый гелий состоит из тех частичек, каждую из которых мы в отдельности могли обнаружить в опыте Вильсона или же видеть вспышки экрана от удара каждой отдельной частицы.

Победа атомных представлений перешла даже за пределы материи, для которой эти представления были созданы. Квантовая теория Планка и атомы света Эйнштейна перенесли атомные представления в волновую теорию света, в свойства эфира и энергии. Не осталось области физики, где бы не было атомов или квантов. Классическое изречение теории сплошности: «Природа не знает скачков» замснено его антитезой: «Все в природе прерывно».

В резком противоречии с этим переворотом в представлениях оставались прежние логические и математические методы, целиком приспособленные к идее сплошности. Это несоответствие па-долго задержало развитие квантовых представлений.

Но если атомы победили, то эта победа стоила им их главного признака — цельности, неделимости. Победив, атом рассыпался на более мелкие единицы: положительное ядро и отрицательные электроны. Атом — это целая система, микрокосмос, в котором десятки электронов вращаются вокруг центрального ядра, подобно тому как планеты вращаются вокруг Солнца. Применяя к движению электронов в атоме квантовые законы, Бор создал модель атома, которая в течение 10 лет служила путеводной нитью для всей физики. Вскоре и компактное ядро — это солнце атома — рассыпалось на свои элементы: положительные протоны и те же отрицательные электроны. Все разнообразие тел живой природы и еще большее разнообразие объектов лаборатории и техники свелось к этим двум основным элементам, к двум электрическим зарядам. Таким образом, природа оказалась насквозь электрифицированной. В природе нет ничего, кроме электричества протонов и электронов. Все явления природы — проявление свойств этих электрических зарядов.

Что же такое протон и электрон? Подобно тому как раньше представляли себе атом в виде упругого сплошного шарика размером в стомиллионную долю сантиметра, так теперь электрон считают шариком, еще в десять тысяч раз меньшим, а протон — даже в десять миллионов раз меньшим, чем прежний атом. Эта картина была крайним пределом атомных идей. Атомная картина представляет самое плотное тело как совокупность частиц, отделенных

друг от друга пустотой. Если бы мы захотели представить атом Бора, то надо было бы вообразить пустоту, в которой движутся пылинки, отдаленные друг от друга на расстояния, в десятки тысяч раз превышающие их собственные размеры. Это картина, к которой мы привыкли в звездном мире. Твердое тело не больше заполнено веществом, чем мир — звездами. Если изобразить атом в масштабе большого зала, то все содержание его предстанет в виде нескольких пылинок размером в десятую долю миллиметра; все остальное — пустота. Некоторые авторы пытались лишить эти пылинки даже их скромных размеров, вводя понятие о точечном электроне как центре сил, не имеющем протяжения. Если вспомнить, что и электромагнитное излучение, распространяющееся в теле, было разбито на отдельно локализованные небольшие кванты, то мы поистине приходим к картине твердого тела как пустыни, в которой блуждают одинокие заряды и кванты. В первом приближении тело — это пустота; при ближайшем рассмотрении там можно заметить и саму материю — электрические заряды.

Волновая механика с новой стороны подошла к, казалось, уже решенному спору между сплошностью и прерывностью. Оказалось, что движение всякого тела, и электрона в частности, представляет собою волновое явление, охватывающее все безграничное пространство. Каждый электрон как бы заполняет собою все пространство. Правда, главная часть его сосредоточена вблизи его центра и быстро ослабевает по всем направлениям, так что уже на сравнительно небольших расстояниях электрон едва проявляется, но все же нигде нельзя указать границы, где бы электрон прекращался полностью. Электрон, который раньше был резко очерченным шариком, теперь расплылся, быстро убывает, но нигде не кончается. Отдельные электроны проникают друг в друга. Таким образом, пустого пространства, собственно говоря, нигде нет. Материя, исходя из многочисленных центров — протонов и электронов, расплывается, заполняя все пространство. Эта картина получила и иное, более соответствующее квантовым воззрениям толкование. Расплывается не самый электрон, а его локализация. Обнаружить его положение в некоторый математический момент времени мы не можем. Наши сведения о положении электрона, основанные на его взаимодействии с другими электронами, носят статистический характер. Мы можем сказать, что он чаще всего бывает вблизи центра и все реже и реже встречается по мере удаления от него. Расплывчатая картина электрона — быть может, только картина вероятности его нахождения в разных точках. Но все законы новой квантовой механики построены так, что только это статистически среднее распределение мы и можем обнаружить. Потому ли, что самый электрон размыт, или потому, что нашему наблюдению доступно только это среднее размытое распределение электрона в разных местах пространства, это на данной стадии наших знаний не так уже важно. Большого об электроне мы пока все равно не знаем.

Новая сплошная картина материи не есть отрицание предыдущей атомной, она есть ее дальнейшее развитие и в то же время синтез с теорией сплошности. И в новой картине сохраняются атомы и молекулы, электроны и протоны, их число и заряды. Даже прежние их размеры не потеряли своего смысла, получив статистическое толкование. Сохранились и важнейшие черты новой физики: полная электрификация вещества, изучение недоступных нашим органам чувств элементарных процессов как основы непосредственно наблюдаемых их проявлений. Интересно, что только в этот период синтеза начали строиться новые формы мышления и применяться те математические методы, которые вытекают из идеи прерывности. И сейчас еще наибольшей трудностью оказывается влить новое вино в новые мехи. Старые еще так привычны, что только немногие физики говорят и мыслят на языке новых квантовых представлений. Большинство новые понятия пытается выражать при помощи старых представлений и принуждено постоянно пользоваться словарем для перевода с нового языка на старый. Раньше мы говорили о вращении маленьких шаровидных электронов вокруг ядра по определенным орбитам, теперь — о стоячих волнах, о колебаниях размытых распределений электронов. Несмотря на видимое различие этих понятий, между ними существует некоторое соответствие, позволяющее часто пользоваться одним языком вместо другого. Но старым языком можно пользоваться только до тех пор, пока он утверждает то же, что и новый. Там, где они в своих утверждениях расходятся, истина оказывается на стороне новой квантовой механики. Чем скорее мы ее освоим, тем лучше.

Мы рассмотрели отдельные элементы материи — атомы, молекулы, протоны и электроны. Какими силами они связываются в одно физическое тело, в особенности твердое тело? Можно различать пять типов сил взаимодействия между атомами.

1. Электростатические силы. Каждый атом представляет собою систему электрических зарядов. В нейтральном состоянии число электронов равно числу зарядов ядра. Одни атомы легко отдают свои электроны, образуя положительные ионы, другие присоединяют лишние электроны, превращаясь в отрицательные ионы. Простейший тип взаимодействия и представляет собою притяжение противоположно заряженных ионов.

Однако и в том случае, если числа положительных и отрицательных зарядов в атоме или молекуле равны друг другу, мы можем иметь электростатические силы, когда расположение зарядов несимметрично. Из атомов только нейтральные газы — гелий, неон, аргон и др. — обладают совершенно симметричным строением, не создающим электрического поля вне атома; все же другие окружены полем, имеющим в одних участках одно, в других — другое направление. Например, может случиться, что совокупность всех отрицательных зарядов сдвинута несколько в сторону по отношению к положительным. Тогда мы имеем как бы



систему из двух раздвинутых зарядов, называемую диполем. Такие диполи притягиваются друг к другу или отталкиваются в зависимости от относительного расположения. Силы взаимодействия убывают с увеличением расстояния между диполями еще быстрее, чем в случае двух зарядов, — как четвертая степень расстояния, тогда как силы между двумя зарядами убывают как квадрат расстояния.

Далее, можно представить себе систему, состоящую из двух противоположных диполей, несколько сдвинутых относительно друг друга, — это квадруполь. Между ними также возможно притяжение или отталкивание, убывающее с расстоянием как шестая его степень.

Можно идти и дальше по этому пути, рассматривая систему двух сдвинутых противоположных квадруполей, или октуполь, и т. д. Еще недавно казалось, что молекулярные силы в твердом поле можно будет целиком свести к такого рода электростатическим взаимодействиям. Оказалось, однако, что их недостаточно: приходится учитывать и силы динамического происхождения.

2. Индукционные силы. Если мы спросим себя, почему не только разноименные ионы, но и заведомо нейтральные атомы и молекулы взаимно притягиваются, несмотря на то что каждая из рассмотренных систем: диполи, квадруполи или октуполи, в зависимости от расположения одинаково часто могла бы испытывать как притяжение, так и отталкивание, то это можно будет объяснить только взаимным влиянием атомов друг на друга. Когда два нейтральных атома сближаются, то электрическое поле одного атома всегда смещает заряды в другом так, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — приближаются, и поэтому влияние притяжения последних преобладает над отталкиванием первых. Если бы даже атом был симметричен, то, попадая в поле другого несимметричного атома, он теряет свою симметрию, превращаясь в диполь, и притом в такой диполь, который втягивается в создавшее его поле. Это — то же самое явление индукции, которым мы объясняем притяжение легких незаряженных предметов всяким электрическим зарядом, например притяжение кусочков бумаги наэлектризованным гребнем.

3. Еще большее значение имеют силы, вызванные взаимной ориентацией атомов при их сближении. Если, например, каждый из атомов обладает дипольным моментом, то такие атомы не только притягиваются или отталкиваются, но и взаимно поворачиваются, притом так, что на каких бы больших расстояниях они ни были расположены, сближаясь и поворачиваясь, они всегда притягиваются. Это — тот тип притяжения, который легко наблюдать между намагниченными иглками. В зависимости от того, повернуты ли две иглки друг к другу своими разноименными или одноименными полюсами, они будут притягиваться или отталкиваться, но если двум иглкам дать возможность вращаться, они всегда повернутся так, чтобы потом притянулись.

4. Многие атомы обладают дипольным моментом и оказывают магнитные действия. Однако по своей величине магнитные взаимодействия между атомами очень малы и существенной роли не играют.

5. Зато исключительное значение получают динамические молекулярные силы, смысл и значение которых лишь в последнее время выяснен квантовой механикой. При изучении взаимодействия двух атомов новая механика в отличие от старой не может рассматривать каждый атом и его энергию в отдельности. Оба они образуют одну нераздельную систему, в которой и каждый электрон приходится рассматривать одновременно связанным с обоими атомами и учитывать возможность перехода электрона из той части, которая раньше была одним атомом, в другую. Эти электроны участвуют в высокочастотных колебаниях, и взаимодействие между ними особенно усиливается в случае резонанса. Характерной чертой новой квантовой механики является также отождествление частоты колебаний с энергией электрона. Поэтому резонируют электроны, обладающие одинаковой энергией. Наконец, третьей чертой, внесенной новой механикой, является утверждение, что в одной системе не может быть двух одинаковых электронов. Поэтому если в двух атомах имеются электроны, одинаковые и по своей энергии и по направлению спинов своей магнитной оси, то в общей системе из этих двух атомов эти электроны уже не могут сохранить прежних значений характеризующих их переменных; их энергии или направления спинов должны стать разными. Из-за этого при сближении двух атомов один или несколько электронов переходят на более высокие уровни энергии, затрачивая работу; следовательно, между ними должно существовать отталкивание. В других случаях, наоборот, переход в одну общую систему при сближении атомов сопровождается уменьшением энергии и, стало быть, приводит к силам притяжения.

Подобные квантовые силы играют основную роль как при образовании молекул, так и при всякого рода взаимодействиях между ними. Наряду с ними существуют и остальные четыре типа сил, но из них только силы между ионами и лишь иногда силы между диполями по своей величине превышают квантовые. Поэтому все химические и молекулярные явления можно разбить на два больших класса: на системы из противоположно заряженных ионов, связанные преимущественно электростатическими силами, и на системы из нейтральных элементов, в которых преобладают динамические квантовые силы.

Рассмотрим сначала ионные, или полярные, системы. Электроны, входящие в состав атома, распределяются в замкнутые группы, окружающие ядро. Ближайшая к ядру группа включает в себе два электрона с наименьшей энергией. Следующие электроны, в силу того требования, что в атоме не может быть двух одинаковых электронов, уже не находят себе места в первой группе и образуют вторую замкнутую и симметричную группу, заклю-

чающую 8 электронов. Далее могут быть группы в 18 и 32 электрона.

Те элементы, число электронов которых как раз заполняет эти замкнутые группы, являются особенно устойчивыми, не вступают в химические реакции и в обмен электронами с другими атомами. Это — нейтральные газы: элементы № 2 (гелий), 10 (неон), 18 (аргон), 36 (криптон), 54 (ксенон), 86 (эманация).<sup>\*</sup> Все же остальные атомы имеют сверх этих законченных групп один, два или три лишних электрона или же им не хватает для образования вполне законченной группы соответственного числа электронов. Первые легко теряют лишние электроны и остаются заряженными положительно; вторые присоединяют недостающие им электроны извне, заряжаясь отрицательно. Таково происхождение положительных и отрицательных ионов. Противоположно заряженные ионы притягиваются друг к другу и соединяются попарно, образуя полярную молекулу. При достаточном охлаждении газ, состоящий из отдельных молекул, конденсируется в жидкость, где ионы различных молекул, притягиваясь друг к другу, отрываются от прежних связей. Однако сильное тепловое движение мешает им расположиться определенным образом, и такая ионная жидкость представляет собою хаотическую смесь положительных и отрицательных ионов, постоянно меняющихся местами.

Накопец, при дальнейшем охлаждении тепловое движение оказывается уже не в силах срывать ионы из положений с наименьшей энергией. Участвуя в хаотическом тепловом движении, они не удаляются заметно от этого своего положения равновесия. Вместо хаотической смеси мы получаем правильно расположенную систему ионов. В тех случаях, когда ионы совершенно симметричны, легко представить себе характер их расположения. Стремясь сблизиться под влиянием электростатических сил, ионы одного знака собираются вокруг ионов другого знака, взаимно окружая друг друга. Вокруг каждого положительного иона справа и слева, сверху и снизу, спереди и сзади расположится по отрицательному иону. Если мы проследим расположение ионов по одному из этих направлений, то на одинаковых расстояниях мы обнаружим чередование противоположных ионов. Из таких цепочек, расположенных рядом друг с другом, составляются плоскости, наподобие шахматной доски заполненные ионами, а из этих плоскостей, наложенных друг над другом, — целое тело — твердый кристалл. Таков, например, кристалл каменной соли, построенный из положительных ионов натрия (атом натрия имеет 11 электронов, т. е. две замкнутые группы и один лишний электрон, который легко отдается, оставляя положительный ион натрия) и отрицательных ионов хлора (№ 17, которому не хватает одного электрона для образования третьей замкнутой группы).

---

<sup>\*</sup> Радон. *Прим. ред.*

Однако такое представление о кристалле, как о системе геометрически правильно расположенных зарядов, есть только схема, которая могла бы быть близкой к реальной картине лишь при полном отсутствии теплового движения. При обычных температурах тепловое движение, если и не достаточно для того, чтобы разрушить структуру кристалла, в отдельных местах все же удаляет то один, то другой ион из положения равновесия. Таким образом, и в твердом кристалле всегда имеется определенная часть ионов, не закрепленных и хаотически перемещающихся в кристалле. Другими словами, и в кристалле возможна диффузия и обмен местами индивидуальных ионов.

Так как сорванные со своего места ионы обладают зарядами, то под влиянием электрических сил они будут преимущественно перемещаться в ту сторону, куда направлена действующая на них сила. В электрическом поле создается односторонне направленный поток зарядов, т. е. электрический ток. Такова природа электропроводности кристаллов рассматриваемого ионного типа.

Изучая явления электропроводности, мне действительно удалось найти многочисленные подтверждения этой картины. Так, например, в некоторых кристаллах можно быстрым охлаждением создать нечто вроде закалки. Значительное число незакрепленных ионов, имевшихся в кристалле при высокой температуре, не успевает осесть на соответствующих свободных местах и остается диссоциированным. Несмотря на охлаждение, кристалл сохраняет повышенную электропроводность. Если в помощь тепловому движению прибавить лучистую энергию, лучи радия, то диссоциация, а с ней и электропроводность временно повышаются, чтобы после прекращения радиации постепенно вернуться в нормальное состояние.

Явления, наблюдаемые при помещении кристалла в электрическое поле, казались настолько сложными и непохожими на электропроводность хороших проводников — металлов и жидких электролитов, что их и не решались называть электропроводностью, а объединяли под заголовком диэлектрических аномалий. Оказалось, однако, что не только качественно, но и количественно всю совокупность наблюдаемых явлений можно было объяснить исходя из указанной картины частично диссоциированного ионного кристалла. Все же усложнения объяснились скоплением ионов одного знака внутри кристалла при пропускании сквозь него тока. Эти объемные заряды своим добавочным полем искажают влияние внешней электродвижущей силы, но могут быть заранее подсчитаны и учтены.

Во многих кристаллах непосредственным химическим анализом удалось показать, что электрический ток сопровождается переносом вещества к электродам в количествах, точно отвечающих закону Фарадея: каждый ион переносит определенное целое число зарядов. Можно было, далее, проследить перемещение каждого из двух противоположных ионов, составляющих полярный кри-

стали, и определить степень диссоциации каждого из них при разных температурах. Так, например, оказалось, что в кристалле каменной соли при комнатных температурах имеется весьма слабая диссоциация ионов натрия, которая быстро возрастает с повышением температуры; теплота диссоциации составляет 10 000 кал/г-атом. Ионы хлора диссоциированы гораздо слабее, чем натрий при комнатной температуре; теплота их диссоциации составляет 30 000 кал. С повышением температуры диссоциация хлора растет значительно быстрее, чем натрия, и уже при 670° С хлор и натрий одинаково диссоциированы, а при более высоких температурах хлор играет преобладающую роль в электропроводности соли.

Под влиянием очень коротких ультрафиолетовых волн, рентгеновых или радиоактивных лучей часть ионов натрия получает обратно утраченные электроны и превращается в атомы натрия, собирающиеся затем внутри кристалла в крупинки. Соль при этом окрашивается в желтый или бурый цвет. Если кристалл соли в этом состоянии осветить видимым светом, то он снова срывает с натрия электроны, и тогда в течение всего времени освещения мы имеем в кристалле постоянно освобождающиеся электроны, так же как и ионы, способные переносить ток. В этих условиях в каменной соли может существовать электронная проводимость. Подобно тому, как закон Фарадея является прямым доказательством ионного характера тока, так и электронный ток может быть обнаружен по отклонению, которое он испытывает в магнитном поле (явление Холла). Это явление действительно удалось наблюдать П. И. Лукирскому. Такая же электронная проводимость отмечена в сере, алмазе, цинковой обманке и ряде других кристаллов.

Большинство естественных кристаллов включает в себе примеси, оказывающие громадное влияние на электропроводность. Примеси, во-первых, являются центрами усиленной диссоциации кристалла, а, во-вторых, не обладая определенным местом в кристаллической решетке, преимущественно (в сравнении с ионами самого кристалла) переносят ток. Примеси иногда в тысячи и десятки тысяч раз увеличивают нормальную проводимость кристалла. Долгое время они представляли собой одно из главных осложнений в изучении электрических свойств кристаллов. Нам удалось, однако, показать, что, очистив кристалл путем многократной тщательной кристаллизации, можно получить вещество со строго определенными и вполне закономерными свойствами.

Помимо химических примесей, условия роста кристалла часто создают в нем неоднородности, которые оказывают влияние на все его свойства. Правильная система ионов, подобно описанной выше, поддерживается только на небольших участках (порядка тысячных или даже миллионных долей миллиметра). Весь кристалл состоит как бы из мелких правильно построенных осколков, не вполне точно сложенных, представляя собой что-то вроде пло-

хой мозаики. Травление и окраска часто обнаруживают мозаичную структуру в кристаллах, по внешнему виду совершенно однородных. В последние годы появился целый поток статей учеников проф. Смекаля, пытавшихся этой мозаичной структурой кристалла объяснить большинство его свойств, в частности его электропроводность. Проверив утверждения и выводы этой теории, нам удалось, однако, установить полную ошибочность подобного объяснения электрических свойств кристаллов.

Кристаллы, элементами структуры которых являются не ионы, а нейтральные группы, и при тепловом движении не отделяют ионов. Большею частью ток в них вызывается полярными примесями или отщеплением электронов. В то время как теория строения и электрических свойств полярных кристаллов хорошо изучена, для нейтральных или гомеополярных кристаллов нет еще ни теории, ни сколь-нибудь полного опытного материала, выясняющего механизм электропроводности.

Группировка атомов внутри кристалла может вызываться не только внешними причинами — примесями или изменением условий роста. Силы взаимодействия часто связывают большие группы атомов (иногда до миллиона) в одно целое, которое подвергается влиянию теплового движения, электрических и магнитных сил. Явление это мы называем молекулярным полем в кристалле. Впервые оно было обнаружено на явлении ферромагнетизма железа, кобальта и никеля. Способность магнитных атомов этих тел устанавливаться под действием магнитных сил в сравнительно слабых полях, несмотря на стремление теплового движения разбросать их по всем направлениям, можно было объяснить только допущением, что атомы этих кристаллов объединены в большие комплексы, способные противостоять тепловому движению.

Необычайная чувствительность современных радиоприемников позволяет непосредственно наблюдать, как при намагничивании железа один за другим поворачиваются эти сложные магнитные комплексы.

Здесь молекулярное поле обнаруживается благодаря тому, что атомы железа магнитны. Если же они являются электрическими, а не магнитными диполями, то они должны обнаружить в электрическом поле явления, аналогичные тем, которые наблюдаются в железе в магнитном поле. Действительно, И. В. Курчатов подтвердил существование этой аналогии на примере кристаллов сегнетовой соли. Как ферромагнитные тела в миллион раз более магнитны, чем другие вещества, так и в сегнетовой соли диэлектрическая постоянная достигает 25 000 против  $2 \div 10$  в других кристаллах. И в этом случае обнаружено явление насыщения и ряд тепловых эффектов, совершенно аналогичных тем, которые характеризуют поведение железа в магнитном поле.

При некоторой температуре, обычно лежащей ниже температуры правления кристалла, тепловое движение разрушает молекулярное поле, разбивает комплексы и кристалл лишается своих

исключительных свойств. У ферромагнитных тел эта температура носит название точки Кюри; для железа она равна  $780^{\circ}\text{C}$ , для никеля она составляет  $356^{\circ}\text{C}$ . У сегнетовой соли подобная температура достигает  $24^{\circ}\text{C}$ . Замечательно, что исчезновение комплексов в кристалле мало сказывается на его структуре, но оно сопровождается поглощением энергии.

Существование комплексов и молекулярного поля в кристалле не есть результат магнитных или электрических моментов атомов. Комплексы создаются молекулярными силами и в первую очередь квантовыми обменными силами. Если элементы этих комплексов обладают магнитным моментом, то мы замечаем исключительные магнитные свойства; если они обладают электрическими диполями, то комплексы проявляются в необычных диэлектрических свойствах. Если же атомы элементов не имеют ни магнитного, ни электрического моментов, то и этих свойств не наблюдается; однако по ходу теплоемкости в точке Кюри можно заметить исчезновение комплексов по изменению энергии кристалла.

Не останавливаясь на других свойствах кристаллов, тепловых и оптических явлениях, которые точно так же объясняются изложенной картиной кристалла как правильно построенной системой электрических зарядов, собранных в атомы и комплексы, рассмотрим еще вопрос об абсолютной величине молекулярных сил. Ограничимся ионными кристаллами, где вопрос решается особенно просто; в качестве примера выберем каменную соль.

Рентгеновский анализ дает точное значение расстояния между ионами натрия и хлора, равное  $2.81 \times 10^{-8}$  см. Заряд этих ионов нам также точно известен: он равен  $4.77 \times 10^{-10}$  абс. ед. Два иона притягиваются, следовательно, с силой, равной произведению их зарядов, деленному на квадрат расстояния, т. е. с силой около  $3 \cdot 10^{-4}$  дин. На  $1 \text{ мм}^2$  приходится около  $10^9$  ионов, следовательно, сила, их притягивающая, равна  $3 \cdot 10^{-4} \times 10^{13} = 3 \cdot 10^9$  дин, или 3000 кг. Этот подсчет очень неточен. Мы совсем не учитывали влияния на данный ион всех других ионов, кроме того, который расположен прямо против него. Мы не учли далее нарушения правильности решетки, вносимого тепловым движением. Если сделать эти поправки, то окажется, что каждый слой ионов в решетке каменной соли притягивается соседним слоем с силой, примерно равной 200 кг на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности слоя.

Если для проверки этого подсчета мы попытаемся разорвать кусок соли, то найдем, что он разрывается при напряжении 400 Г, а не 200 кг на  $1 \text{ мм}^2$ , т. е. при напряжении, в 500 раз меньшем. Можно было бы предположить, что это расхождение вызвано не ошибочностью теории, а неправильностью опыта. При разрыве соли отрыв происходит не по всему сечению сразу, а, начиная от маленькой трещины на поверхности, постепенно распространяется через все сечение. Ясно, что в этом случае

для разрыва нужно приложить силу, во много раз меньшую, так как она разрывает в каждый данный момент не всю площадь, а только очень маленький ее участок, для разрыва которого этой силы достаточно. Если это так, то можно было ожидать, что, устранив трещины на поверхности, мы затрудним разрыв. Действительно, когда мы попытались разорвать образец соли, помещенный в теплую воду, которая растворяла его поверхность, не давая образоваться трещинам, то оказалось, что для разрыва потребовалось не 400 Г, а 160 кГ на 1 мм<sup>2</sup>, т. е. примерно столько, сколько и следовало ожидать. Другой опыт, давший такой же результат, был произведен с шариком из соли, охлажденным в жидком воздухе и затем внезапно внесенным в расплавленный свинец. Здесь на поверхности вообще не возникает растяжений, и поэтому имеющиеся трещины не могут распространиться вовнутрь. В центре же шара создается всестороннее растяжение до 70 кГ на 1 мм<sup>2</sup>, которое, однако, кристалла не разрушает.

Каковы бы ни были технические перспективы доведения механической (и электрической) прочности и диэлектрической постоянной до их теоретического предела, самый факт столь значительного расширения пределов использования материалов достаточно интересен. Поскольку экспериментально обнаружен и твердо установлен факт возрастания механической прочности твердых тел, ясно, что раньше или позже он будет использован техпикой, войдет в жизнь. Наш долг состоит в том, чтобы это произошло раньше, а не позже.

Статья написана на основе речи, произнесенной на торжественном годовичном собрании Академии наук СССР 2 февраля 1931 г., и опубликована в кн.: Отчет о деятельности Академии наук СССР за 1930 г. Л., 1931, с. 1—15.

Данная статья в наибольшей степени, чем другие, включенные в сборник, нуждается в корректирующих примечаниях. Однако неточности, обусловленные уровнем имевшихся ко времени ее написания знаний (не был открыт нейтрон и поэтому не было нейтрон-протонной модели строения ядра и т. д.), легко могут быть установлены читателем. Поэтому было решено не отягощать статью соответствующими построчными примечаниями.

## РАЗВИТИЕ АТОМИСТИЧЕСКИХ ВОЗЗРЕНИЙ В XX ВЕКЕ

Что представляла собой физика в 1908 г., когда Ленин писал свой «Материализм и эмпириокритицизм»? Необычность представлений, которые появились к этому времени, пожалуй, превосходит новизну того, что мы имеем сейчас и с чем не можем справиться.

В самом деле, тогда только что создалось совершенно новое представление о массе. В 1902 г. появилась кажущаяся масса электрона, которая, как думали сначала, только дополнила при-



вычную массу, а потом и совершенно ее исключила и сделала переменной. Затем получила массу электромагнитная энергия; вслед за этим дано было обобщение понятия массы и энергии в теории относительности. Масса из меры материи сделалась мерой энергии. Этот резкий, катастрофический переворот касался одного из самых основных для материалиста вопросов — конкретного содержания понятия материи и массы. Масса перестала быть мерой материи, а материя отождествлялась с электрическим зарядом. Совокупность электрических зарядов представляла собой материю. Вместо механики, механических сил и движения, как основы всяких физических процессов, электрическое взаимодействие между зарядами сделалось тем основным орудием, при помощи которого эта материя проявляется во вне и взаимодействует между собой.

Наконец, к этому же времени были уже установлены основы квантовых явлений в природе. Прежде всего появились кванты света, представление о которых было выведено побочным статистическим путем из рассмотрения равновесной лучистой энергии, но которые в 1905 г. в классической работе Эйнштейна получили физическое содержание. Вместо электромагнитных волн появились фотоны. В 1907 г. представления квантовой теории из области лучистой энергии были перенесены на само вещество: к этому году относится первая работа по квантовой теории теплоемкости Эйнштейна.

Таким образом, электромагнитная теория механики, связь материи с зарядом, а массы с энергией, квантовая природа элементарных явлений представляли действительную революцию всех основных понятий физики.

Я не стану здесь цитировать книги Ленина — всем известно, что ни одно из этих новых представлений не было им отнесено к области идеализма, а наоборот, вся совокупность их рассматривалась как блестящее подтверждение диалектического материализма, чем она и была на самом деле.

Ближайший этап, 1907—1913 гг., был периодом чистого атомизма, с одной стороны, и установления квантовых фактов, с другой стороны. К этому периоду относится ряд новых методов, которые сделались основой новой физики, методов, которые уже не косвенно, а непосредственно убеждают нас в реальном существовании атомов и отдельных частиц. Здесь прежде всего нужно назвать изучение броуновского движения, впервые непосредственно показавшего реальность атомов. Вслед за этим появились еще более убедительные объективные факты, был создан счетчик Гейгера, в 1911 г. разработан Вильсопом замечательный метод обнаружения путей отдельных частиц. В это же время в ряде опытов Резерфорд прощупал недра атома и дал те основы, на которых потом была построена его модель.

Параллельно и одновременно с установлением непосредственных доказательств атомизма материи столь же непосредствен-

ными опытами обосновывались квантовые представления. Сюда можно отнести опыты Милликена, установившие связь между скоростью фотоэлектронов и частотой света. Примерно в это же время, начиная с 1912 г., появился ряд работ, обосновывающих экспериментальным путем применимость квантовых законов не только к лучистой энергии, но и к самой материи. Это — исследование теплоемкости при низких температурах в связи с теоремой Нерста.

Эта эпоха закончилась в 1913 г. созданием модели атома Бора. Модель Бора, с одной стороны, есть микрокосм, повторение солнечной системы, с другой стороны, однако, в этой модели имеются два постулата, совершенно чуждые этой модели и всей механике и электродинамике, на которых построена сама модель.

Первые применения этой модели были эпохой блестящего, я бы сказал, триумфального шествия атома Бора через все области физики. Ее успехи хорошо известны, и я только паномню типичные моменты этой истории. В первой же работе Бора простая механическая картина электронов, движущихся по круговой орбите вокруг ядра, была исправлена вращением вокруг общего центра тяжести. Как известно, такое различие между спектрами водорода и гелия получило здесь элементарное толкование.

Затем последовало появление эллиптических орбит и связанное с этим расширение теории линейных спектров; квантование положения орбит в пространстве и их связь с магнитными моментами. Хорошо известно, какое ясное и простое толкование Бор дал периодической системе элементов, постепенно наслаивая на ядро один электрон за другим, как выявились парамагнитные и ферромагнитные материалы.

Все это — ряд блестящих успехов, не говоря о прямом, исключительном по своей точности и беспримерном в истории физики подтверждении сериальных законов.

Однако внутреннее противоречие между механической картиной движущегося электрона и квантовыми постулатами, определяющими положение орбит и условия перехода с одной орбиты на другую, все обострялось по мере применения теории ко все большему разнообразию явлений природы. Появился принцип соответствия Бора, который установил некоторый параллелизм между свойствами модели по обычным законам электродинамики, лежащими в основе ее, и теми свойствами, которые она получает благодаря добавочным квантовым постулатам. Получилась компромиссная теория, которая давала сначала последовательную электромагнитную картину атома. Потом эта механическая картина сопоставлялась с системой действительных, квантовых состояний.

Последним в развитии этой модели крупным теоретическим вкладом был принцип Паули. Введя в дополнение к трем основным квантовым величинам, определяющим данную орбиту, еще

четвертую, не имеющую поначалу четкого физического смысла, Паули показал, что можно дать полную схему всех атомов и всех спектров, испускаемых атомами любого элемента.

Вскоре, однако, ученики Эренфеста — Гаудсмит и Уленбек — нашли физический смысл четвертого квантового числа: так же, как Земля, вращаясь вокруг Солнца, в то же время вращается вокруг оси, так и электроны не только движутся по определенной орбите в пространстве, но в то же время вращаются вокруг собственной оси. И вот момент количества движения вокруг собственной оси и оказался четвертой величиной, характеризующей движение электрона в атоме.

До этого момента теория, противоречивая в самих своих основах, компромиссная по форме, все же была ведущим рычагом всей физики.

После этого кульминационного пункта теории Бора выступили на сцену трудности, которые были в ней скрыты. Несмотря на весь уточненный математический аппарат, не удавалось пойти дальше того первого шага, который сделал Бор в самом начале, количественно вычислив спектр водорода. Данные для следующего элемента — гелия с двумя электронами — получились хотя и близкими к действительности, но, несомненно, не совпадали с опытом. И все попытки дальнейшим уточнением достигнуть такого совпадения ни к чему не приводили. Стало ясно, что в этой модели что-то не совсем верно, что-то должно быть изменено, чтобы получить правильный результат.

Также неудачно было объяснение сложного явления Зеемана — количественное предсказание интенсивности отдельных линий. И, наконец, появилась чисто логическая трудность модели Бора, по которой электрон, хотя и находится на одной вполне определенной орбите и еще, может быть, на другую орбиту не перешел, но уже испытывает влияние всех тех орбит, на которые он может перейти.

Остроту момента, значение этих трудностей, которые испытывала теория атома, сейчас, пожалуй, даже трудно себе представить.

Наглядным примером этого положения может служить одна моя беседа с Лоренцем. В 1924 г., излагая ход развития своей научной деятельности, приведшей к блестяще подтвержденной электронной теории, Лоренц в квантовом атоме видел неразрешимое противоречие, которое приводило его в отчаяние: «Сегодня утверждаешь прямо противоположное тому, что говорил вчера; в таком случае вообще нет критерия истины, а следовательно, вообще неизвестно, что значит наука. Я жалею, что не умер пять лет тому назад, когда этих противоречий не было».

Все знают, кто такой был Лоренц. И такой отчаянный вывод из всей истории его научной жизни достаточно показателен для физики того времени. Но во время этой беседы с Лоренцем уже намечался выход из тупика, в который зашла, по мнению Ло-

ренца, физика. В том же 1924 г. была создана одна из форм квантовой механики — неожиданная по тогдашнему времени теория де Бройля.

Скоро появилось другое решение этого противоречия — первые работы Гейзенберга, которые представляли собою нечто вроде словаря, с одной стороны которого стояли все операции старой электродинамики и механики, а с другой стороны каждая такая операция переводилась на новый язык, каждой прежней операции соответствовала некоторая новая операция.

Эта попытка была затем развита Гейзенбергом вместе с Борном и привела к матричной форме квантовых законов. Вместо отдельных координат, скоростей, с которыми мы имели дело раньше, каждая величина характеризовалась целой системой, матрицей, некоторой таблицей значений. Эта матрица сразу же уничтожила то логическое затруднение, о котором я говорил. Именно свойства данного состояния электрона определялись уже не его орбитой, а совокупностью всех возможных орбит. Противоречие было устранимо. Можно было придать матрицам некоторый физический смысл, но уже отличный от прежнего. Вместо того, чтобы говорить об электроны, движущемся по какой-то орбите, можно было говорить о пульсациях электрона, о стоячих волнах, в которых одновременно участвует этот электрон.

Параллельно с этим развилось и то направление, которое намечено было де Бройлем, — в систематической теории Шредингера волновая механика получила свое законченное выражение. Вскоре выяснилось, что эти два пути, столь различные по своей математической форме, по своему исходному пункту оказались совершенно идентичными по выводам.

Теория Шредингера позволяла еще сохранить некоторую наглядность. Казалось, что можно себе представить электрон исходя из волновой точки зрения как совокупность отдельных волн, как пакет волн, сосредоточенный в сравнительно небольшом объеме. С другой стороны, казалось, что новые материальные электронные волны можно также представить себе в достаточной степени наглядно как волны, проходящие в трехмерном пространстве, хотя и отличные от электромагнитных.

Однако эта попытка оказалась неудачной. Выяснилось, что при помощи наглядных представлений, построенных на классической механике, невозможно выразить новую систему квантовой механики Гейзенберга и Борна или Шредингера и де Бройля. От такой наглядности пришлось отказаться.

Здесь я подхожу к очень существенному вопросу — к вопросу о наглядности теории. Почему это на определенном этапе развития физика вдруг перестает быть наглядной, не может больше пользоваться наглядными моделями? Нужно сказать, что это случается каждый раз и, как я попытаюсь показать, это неизбежно, когда физики переходят к существенно новому типу явлений, к существенно новой области.

Я хочу вспомнить из той же беседы с Лоренцем другой момент, касающийся не конца, а самого начала его деятельности, когда только что появилась теория Максвелла. Почувствовав громадное значение этой теории, Лоренц стал ее изучать, но убедился, что ничего не понимает, ничего, кроме формул, не может извлечь из этой теории.

Узнав, что вышло французское изложение теории Максвелла, Лоренц сейчас же поехал в Париж, ожидая, что автор, изложивший Максвелла, очевидно, его понимает. Но автор этого изложения ему сказал, что теорию Максвелла вообще нельзя понять: это чисто математическая, совершенно абстрактная форма; физического же смысла теория Максвелла иметь не может. Очень любопытно, что это утверждение почти дословно напоминает то, что мы сейчас слышим о новой квантовой механике.

Что это значит? Я думаю, что этот факт есть одно из доказательств материализма. Попытаюсь это обосновать.

Что значит, что для нас новая теория не наглядна? Это значит, что опыт привел нас к каким-то новым явлениям, для которых вся сложившаяся в нашем мозгу в результате всего предыдущего опыта система представлений оказывается непригодной, это значит, что мы не можем излагать новые факты при помощи старых образов, уже привычных для нас и поэтому наглядных. Но ведь это возможно только в том случае, если эти факты имеют место вне нас, в реально существующей природе. В нас самих не было никаких решительно предпосылок для того, чтобы придумать фотоны, в движении электронов заподозрить волновой процесс, чтобы создать синтез корпускул и волн, — у нас для этих понятий не нашлось ни слов, ни представлений.

Такие моменты, когда наука перестает быть наглядной, когда она по существу не может быть наглядной, могут быть обусловлены только реальным существованием внешнего мира. Поэтому, мне кажется, бояться отсутствия наглядности у нас нет оснований.

Я хотел бы на двух примерах показать действительную необходимость создания новых представлений, полную невозможность какой бы то ни было комбинации привычных величин. Одно из этих явлений — дифракция электронов, которая дала первое непосредственное опытное обоснование волновой природы движения. Эта электронная дифракция сделалась одним из широко распространенных методов изучения структуры поверхностных слоев и кристаллов, исследования коррозии и поверхностного катализа. Электронная дифракция наряду с рентгеновской дифракцией становится методом не только физических исследований, но и технического контроля. Это уже область, богатая экспериментальными фактами.

Будем ли мы рассматривать дифракцию электронов при прохождении их через два близких отверстия или при отражении от ряда последовательных атомных слоев кристалла, нам придется

допустить, что одни и те же электроны одновременно проходят через оба отверстия или отражаются последовательно от целого ряда слоев, несмотря на то что потом мы можем их обнаружить как отдельные электроны, сконцентрированные в очень малом объеме, и что можем даже наблюдать пути, пройденные отдельным электроном после дифракции.

Другое явление — прохождение электронов сквозь энергетические барьеры, значительно превышающие запас их кинетической энергии. Это явление мы наблюдаем в фотоэффекте, в плохих контактах, в атомном ядре. Применяя понятие об определенной скорости электрона в определенной точке пространства внутри барьера, пришлось бы признать его скорость мнимой, его кинетическую энергию отрицательной. Все эти трудности устраняются принципом неопределенности и возникают оттого, что мы пытаемся объяснить новые явления старыми, совершенно для них непригодными, бессмысленными в этой области представлениями. Также нелепо, например, определять плотность тела в участках размером в  $10^{-9}$  см, хотя в это определение и можно вложить определенный смысл.

Таким образом, волновые представления в атомной физике настойчиво диктуются нашим опытом и неизбежно требуют создания новых, нам еще не привычных, не допускающих наглядного истолкования законов. Пока они описываются уравнениями Шредингера.

С другой стороны, направление Борна и Гейзенберга тоже на первых же шагах получило блестящее подтверждение. При помощи матричной механики удалось определить интенсивность линий, разобраться в явлениях Штарка и Зеемана, дать им количественную теорию и т. д.

Таким образом, новая квантовая механика, хотя с момента ее рождения прошло еще немного лет, обоснована опытом не менее прочно и не менее широко, чем старая квантовая механика, электромагнитная теория Максвелла или ньютонова механика. Несомненно, что дуализм частицы и волны неразрешим в рамках тех величин и представлений, которыми мы описывали и объясняли окружающие нас макроскопические явления.

Простое рассмотрение любого из фактов атомной физики, а они нисколько не стали хуже от того, что являются новыми, с неизбежностью приводит нас к заключению, что здесь нужны новые понятия, новый язык.

Эти новые представления ищет и Дирак в своих уравнениях, и Шредингер в волновой механике, и Гейзенберг в своем принципе неопределенности. Эти новые методы еще несовершенны, им еще не удастся дать законченные, строго систематические формулировки, подобные системе классической механики Ньютона, тем не менее это черты той новой картины мира, которую мы видим пока в отдельные просветы в том или другом аспекте. Каждое из этих представлений есть большой и несомненно положительный

шаг вперед, и каждое из них, мне кажется, если его правильно разобрать, есть одно из новых подтверждений диалектического материализма. Они лишней 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.

Критерием ценности новых теорий является их соответствие всей совокупности нашего опыта. А этот экзамен теории Дирака, Шредингера и Гейзенберга выдержали. Конечно, эти новые представления затронули очень многое из логических привычек и макроскопического опыта и больно ударили по нашей психологической лени. Если бы мы были махистами, это было бы, мне кажется, убедительным возражением. Может быть, неэкономно перестраивать все наше мировоззрение для того, чтобы правильно описать определенную группу явлений. Не проще ли поступить так: все прежнее прекрасно можно описывать по-старому, а для нового можно добавить какие-нибудь мнемонические правила. Это будет гораздо экономнее. Если мы не уверены, что здесь проявляются свойства реального, вне нас существующего мира, то вряд ли стоит производить такую коренную ломку и создавать себе такие психологические неприятности.

Принцип неопределенности является одной из новых и, мне кажется, очень положительных форм описания существа тех новых свойств, которые мы усмотрели в природе, когда подошли к атомным явлениям. Он неизбежно вносит новое содержание в понимание причинности, существующей в природе.

Мы думали, что лишь макроскопические, грубые явления представляют собой результат статистической игры каких-то элементарных процессов, а элементарные механические или электродинамические явления подчиняются однозначно законам механики. Почему мы так думали? Да просто потому, что мы ничего о них не знали. Диалектично ли было так думать? Я бы сказал — нет. Считать, что разнообразие природы ограничивается атомами и на этом кончается, — вряд ли диалектично. На самом деле, когда мы подошли к этим атомам, то оказалось, что атомы не только сложные тела, — это нас не удивило, — но что законы их вовсе не простые элементарные законы обычной механики, целиком перенесенные в атомные размеры, что и здесь та же статистика, то же колоссальное разнообразие. В основе грубой статистики лежит не однозначная механика, а опять-таки та же многозначная атомная статистика. Принцип неопределенности — это второй принципиально новый шаг в метрологии, в науке об измерениях, позволяющей количественно изучать природу. Первый существенный шаг был сделан теорией относительности.

До теории относительности мы не задавали себе вопрос о том, как следует производить измерения при быстром движении. Обыкновенно достаточно приставить масштаб и отсчитать его показания у двух отметок: здесь 12, там 34, значит, расстояние равно 22. Но оказалось, что когда тело быстро движется, этот прием не годится: пока посмотрели на один конец, другой отъехал и отсчет теряет смысл. Нужно было разобраться в том, что значит измерять движущийся объект; частная теория относительности и дает ответ, как в таком случае поступать. Она дает единственный логически возможный, вытекающий из наших знаний о природе метод. Наилучшее орудие измерения — свет, но он движется с конечной скоростью, и это приводит к тем особенностям измерения пространства и времени, которые дает теория относительности. Это первый этап метрологии.

Но, измеряя какую-то величину, мы должны помнить, что при всяком измерении возможна ошибка. Мы и здесь поступали некритически; мы рассуждали так: этот прибор дает такую-то ошибку, а другой — иную. Приборы наши вообще несовершенны. Но если бы они были совершенны, мы могли бы измерять с какой угодно точностью. Почему это так? Только потому, что мы были далеки от истинного предела точности. Если вы знаете, что ничего лучше светового луча для измерения нет, а световой луч — это совокупность квантов, значит, в природе нет ничего, что могло бы быть измерено с точностью кванта. Но не в этом только дело. Дуализм частицы материи выявил более глубокие стороны этого явления. Оказывается, что существует принципиальная граница точности, вытекающая из основных свойств материи. Еще в самом начале нашего столетия первая квантовая теория лучистой энергии Планка принуждена была разбить фазовое пространство на отдельные участки, площадь которых равна постоянной Планка. Ничего другого не утверждает принцип неопределенности. Он только более последователен. По Планку, в самом пространстве как бы имелись уже твердые перегородки, хотя они определяли не отдельные координаты, а их произведения, площади. Только переход из одной площадки в другую есть реальное явление. Теперь нет перегородок, но размер площадки — это предел неопределенности. Следовательно, мы не можем точно задать начальное состояние. Раньше мы без всяких оснований считали, что можем, потому только, что мы не ставили перед собой этого вопроса. А если, как оказывается, его задать нельзя, то никакая механика не может дать однозначного предсказания того, что произойдет. Невозможность однозначной причинности просто вытекает из того, что априорные предпосылки, которые когда-то делались без всяких оснований, оказались неверными. Начальные состояния в том виде, как это нужно для расчета, задавать нельзя.

Следует ли из этого, что теперь есть свобода воли вместо причинности? Я недавно был на Днепрострое и не видел, чтобы



он капризничал. Он действует по самым постоянным законам, как и следует по принципу неопределенности Гейзенберга, и свободы воли не проявляет. Это не шутка. На самом деле макроскопические явления, на изучении которых построен наш опыт, протекают, конечно, закономерно. Но в основе этой закономерности лежит статистика — и далее, как оказалось, еще более глубокая статистика статистик.

В какой степени это нарушает наше основное логическое понятие причинности? Мне кажется, что ни в какой степени. Здесь есть только его уточнение, его углубление, но не его отрицание. Надо помнить, что неопределенность относится только к той новой области внутриатомных явлений, которые имеют размер, сравнимый с длиной волны атомных движений, только в таких миллиардных долях миллиметра эти свойства и проявляются.

Почему мы это положение вещей воспринимаем как новое затруднение? Причина здесь вот в чем. Если бы мы удовлетворились волновой картиной описания, то не было бы никаких трудностей. Она определяется однозначно. Трудность возникает оттого и только оттого, что мы фактически умеем наблюдать не только эту волновую статистику, но и элементарные электроны, отдельные атомы, отдельные молекулы. Мы не можем довольствоваться статистической трактовкой волновой картины, так как она не указывает, где и в каком месте мы поймем этот электрон, а определяет вероятность нахождения его в том или другом месте.

Мне кажется, что более подробный разбор того, что вытекает из принципа неопределенности, заставляет считать его очень крупным достижением, льющим воду на мельницу диалектического материализма, а не каким-то подводным камнем.

Но кроме принципа неопределенности, который совсем не страшен, а, наоборот, представляет собою развитие и конкретизацию диалектических воззрений на природу, новая физика выдвигает целый ряд других, более сложных проблем. Из того же закона статистической закономерности вытекает весьма мало наглядное следствие — лишение частицы ее индивидуальности. Имея совокупность частиц, мы можем сказать, что здесь находится 2 360 000 этих частиц, и в то же время одна частица не только не отличима от другой, но не имеет своей индивидуальности. Ничего физически не значит, что какая-то одна частица стала на место другой, а другая — на место первой. От такого представления нужно отказаться. Этого требует практическое применение новой статистики фотонов для лучистой энергии, статистики электронов в металлах, статистики газовых молекул и вычисление химических постоянных. Наконец, именно на отсутствии индивидуальности, на необходимости рассматривать две отдельные взаимодействующие частицы как одну неделимую систему основана вся химия. Все основные взаимодействия, с которыми мы имеем дело, химические и молекулярные, сводятся,

рядом с электростатикой, к силам обмена, которые именно в том и заключаются, что два электрона двух частиц представляют собой как бы двойной электрон; он может быть в одной и другой частице, может обмениваться местами, и результат этого проявляется как новая система сил, которая играет в природе решающую роль. Это можно объяснить и более наглядно. Вы можете представить себе эти атомы окутанными облаками электронов. Это электронное облако, связывающее атомы, соответствует во всех деталях тем валентностям, которыми издавна пользовались в химической науке. Вопрос о потере индивидуальности частицами принципиально более важен, чем новая форма причинных связей, с которой он, впрочем, тесно связан.

Накопец, неисчерпаемый клад трудностей (в том смысле, что все новое трудно) имеется в новых фактах, вскрытых изучением атомного ядра примерно с 1932 г. Прежде всего оказалось, что когда мы от 100-миллионных долей сантиметра перешли к триллионным долям сантиметра, к ядру, то здесь и квантовая механика оказалась бессильной, по крайней мере по отношению к легким частицам, к электронам. Электрон в ядре потерял свои свойства, ему там нет места. Как известно, эти трудности электрона в ядре как раз и показали предел применимости квантовой механики, показали, что здесь мы вступаем в новую область явлений, для которой непригодна вся та система представлений, которая только что создана новой волновой механикой. Здесь и возник вопрос о справедливости закона сохранения энергии. На эту постановку вопроса у нас накинулись как на некое преступление против диалектического материализма (конечно, это относится далеко не ко всем философам, но к очень многим из них). Я уверен, что такое обвинение есть совершенное непонимание основ диалектического материализма. Наоборот, вполне возможно, что, переходя в новую, неисследованную область при таком резком количественном изменении масштаба, мы натолкнемся на новые качественные свойства. В этом не было бы ничего удивительного, и отрицать это заранее ни в каком случае нельзя. Всякий закон природы, в частности и закон сохранения энергии, не априорный закон, не какая-то категория нашего сознания, а результат обобщения опыта, обширной практики. Никакой опытный закон не может претендовать на то, чтобы быть обязательно справедливым для такой области явлений, которая впервые становится доступной опыту. Святых законов в физике не может быть, закон сохранения энергии тоже не есть святой закон, и канонизировать его нет никаких оснований. Однако, по моему мнению, нет оснований считать, что те факты, которые заставили усомниться в законе сохранения энергии, его действительно опровергают.

Из того, что в новой области при резком количественном изменении могут быть установлены новые качественные закономерности и что даже закон сохранения энергии может измениться, не следует, что непременно каждый раз, когда мы подходим к по-

вому явлению, нужно прежде всего считать все прежние обобщения неверными.

На самом деле дальнейший ход опытов подтвердил, что достаточных оснований для отказа от закона сохранения энергии в ядре не было. За отказ говорил только тот факт, что радиоактивные вещества испускают электроны (бета-лучи) всевозможных скоростей, хотя можно было думать, что при радиоактивных процессах ядра переходят из одного определенного состояния в другое состояние столь же определенной энергии. Это не соответствует схеме сохранения энергии. Но потому ли, что самый закон сохранения энергии неверен, или потому, что мы знаем только часть явления? Аналогичных противоречий можно найти сколько угодно. Например, стакан чаю охлаждается на столе. Что же, значит, закон сохранения энергии неверен? Мы знаем, как на самом деле обстоит дело, и если рассмотреть, что происходит в воздухе, то можно найти пропавшую энергию. Поэтому не было достаточных оснований утверждать, что в ядре мы натолкнулись на противоречие в самом законе, а не на некоторую неполноту наших знаний.

Паули предположил, что, может быть, вместе с электронами из ядра вылетает и еще что-нибудь, отнимающее часть энергии. То, что вылетает, не может обладать зарядом, так как не меняет заряда ядра. Эти нейтральные частички должны обладать и очень малой массой, раз мы не замечаем их ударов о другие ядра. Это — нейтрино.

Если верно то, что энергия при переходе распределяется между видимым, измеримым электроном и уходящим, незаметным для нас нейтрино в разных пропорциях, то крайним пределом будет тот, когда вся энергия была бы поглощена электроном, а нейтрино получили бы ее мало или почти ничего. Но тогда наибольшая энергия, которую получает электрон, и будет всей энергией. Это те случаи, когда на долю нейтрино почти ничего не остается. Поэтому наивысшая скорость испускаемых электронов должна отвечать всей энергии, которая освобождается в ядре.

И вот недавно Эллис очень тщательными и чрезвычайно точными наблюдениями с несомненностью показал, что именно для этого предела, т. е. для энергии, теряемой ядром, ни малейшего отступления от закона сохранения энергии нет.

Таким образом, закон сохранения энергии к настоящему моменту пока сохранен. Нельзя утверждать, что для этого нет другого пути, кроме нейтрино. Это только один из возможных способов, подтверждающийся, впрочем, и другими явлениями. На основе этого представления Ферми создал теорию испускания бета-лучей, которая находится в хорошем согласии с опытом. Таким образом, нейтрино имеет пока две точки опоры. Может быть, этого недостаточно для полной устойчивости и достоверности, но некоторую возможность существования эти две точки соприкосновения с опытом ему дают.

Вместе с этим нейтрино и с твердо установленным нейтроном в наши представления о внешнем мире входит некоторый новый, очень существенный элемент. В результате эволюции, которая выявилась к моменту написания книги Ленина, у нас было сравнительно простое представление об энергии, материи, веществе и т. д. Мы представляли себе дело так, что материя есть совокупность электрических зарядов. Эти электрические заряды в зависимости от расстояния и их движения обладают определенной энергией. Мера энергии, которой обладает данная система электронов, есть масса, измеряемая весом данной системы. Значит, взвешивание определяет запас энергии, которой обладает электрическая материя. Материя была носителем энергии или массы тела — очень простая и удобная концепция, исходившая из того, что вся физическая материя состоит из электрических зарядов.

Это представление теперь уже под сомнением, поскольку, кроме протонов и электронов, а потом и позитронов, появились еще нейтроны, а потом и нейтрино. В физической материи есть и электрическая, и неэлектрическая части. Конечно, может быть, нейтрон представляет собою систему электрических зарядов. Более спорно такое допущение по отношению к нейтрино, если он существует. Абсолютной необходимости утверждать, что существует неэлектрическая материя, нет, но к этому нужно быть готовым. Со дня на день факты могут нас подвести к тому, что мы должны будем отказаться от универсальности электрической природы материи.

Другая область фактов — это явления, которые носят очень странные названия: аннигиляция материи и материализация энергии, и конечно, очень легко могут послужить основанием для любой идеалистической философии, так же как в 1908 г. утверждения, что материя исчезла. Самые факты тем не менее существуют.

Опять-таки в данный момент нельзя еще с полной уверенностью сказать, происходит ли такое явление, что позитрон соединяется с электроном в пустом пространстве и единственным результатом при этом оказывается испускание двух световых квантов. Но есть основание думать, что это может происходить в природе.

Очевидно, конечно, что философская система, и в частности система материализма, не может быть опровергнута или доказана таким опытом: если окажется, что позитроны аннигилируют только около ядра, то материализм правилен, а если аннигиляция имеет место вне ядра, то материализм надо отбросить. Конечно, от того или иного решения этого опыта совсем не может измениться признание существования внешнего мира, но очень сильно изменится конкретное содержание того, что мы понимаем под физической материей и ее соотношением с энергией.

Если, действительно, положительный и отрицательный электроны, соединясь, могут создать световой квант и наоборот, то

у нас имеется следующая альтернатива. Пользуясь прежними нашими представлениями и приспособляя их к этим новым фактам, мы могли бы продолжать считать заряд материей, но тогда материя должна быть алгебраической, а не арифметической, материя может быть положительной и отрицательной, плюс и минус могут взаимно уничтожаться. Отсюда становится очевидным, какие трудности связаны с такого рода обобщением понятия о физической материи, с переходом от арифметики к алгебре.

Если же исходить из того, что материей может быть только то, что сохраняется, причем сохраняется арифметически, т. е. буквально, а не в расширенном алгебраическом смысле, то можно считать материей энергию, единственную сейчас величину, которая не исчезает и не создается нигде. И этот выход не лишен новых больших трудностей. Хорошо было представить себе, что материей является заряд, а эта электрическая материя является носителем энергии. Если сама энергия и есть физическая материя, то представление о материи как носителе этой энергии и об энергии как одном из свойств этого носителя отпадает — сама энергия становится тогда материей.

Я хотел этими примерами только указать на новые, по-моему, очень серьезные проблемы, которые ставятся современной физикой. И мне кажется, что активная методология и философия физики должны уже сейчас анализировать эти передовые вопросы физики, подготавливая почву для творческой работы. Марксистская философия должна идти в ногу с современной физикой, ставя и освещая передовые ее проблемы не только тогда, когда идеалисты начинают толковать и наводить туман вокруг новых фактов. Еще в ходе исследования, когда эти факты выясняются и изучаются, нужно давать им правильную, методологически четкую интерпретацию и ясный анализ всех вытекающих возможностей.

25 лет развития атомной физики дали столько наглядных подтверждений марксистской философии, что они должны были бы вдумывающегося в ход этого развития физика привести к единственно возможной методологической позиции, к позиции диалектического материализма.

И на самом деле многие физики отчетливо поняли, что это единственный путь для правильного понимания истории физики. В 1933 г. на физико-химическом конгрессе Лашевен высказался в том смысле, что хотим мы или не хотим марксизма, но другого выхода нет — вся история ведет нас к нему, как к единственно возможной теории. На еще более отчетливой марксистской позиции стоит другой крупный ученый современности — Блеккет, один из ведущих физиков в области учения о ядре, но и целый ряд других. Если разобраться во взглядах Бора, то непрерывно им применяемое слово «диалектика» на самом деле означает, что он совсем не так далек от диалектического понимания физики.

Позволю себе напомнить те черты в истории физики, которые особенно убедительны в этом отношении. Прежде всего замечу, что хотя вышедшая в 1909 г. книга Ленина была посвящена борьбе с махизмом, в самой физике махизм, собственно говоря, уже потерял корни, что Ленин и показал. Махизм был запоздалым философским отражением научной системы, существовавшей до Маха, в 1855—1895 гг., когда развилась феноменологическая физика на основании уравнений термодинамики, теории сплошности, теории упругости и уравнений Максвелла. Это чистая теория сплошности и термодинамика действительно являлись областью, где феноменологический метод одно время был основным методом физического исследования. Но XX в. с самого начала характеризуется отказом от феноменологической физики. С 1900 по 1925 г. мы всегда искали механизм явлений, а не формальные законы. Весь смысл этой эпохи физики заключался в признании реальности внешнего мира, в раскрытии внутреннего механизма явлений природы. Так что в то время, когда взгляды Маха стали проникать в философию и получили здесь настолько широкое развитие, что сделались орудием реакции, политически опасным явлением, в это время они уже не соответствовали содержанию самой физики. Среди физиков махизм и не встречал особого сочувствия, потому что он тормозил творческую работу. Для физики это была реакционная философия. Последним ее успехом было самоубийство Больцмана в 1906 г. С 1905 г. атомизм победил.

В эту эпоху с необычайной яркостью проявилась теснейшая связь между наукой и производительными силами, в частности техникой.

Появление авиации и быстро вращающихся машин потребовало совершенно иного подхода к изучению материалов. Явление усталости сделалось лимитирующим свойством материала. Здесь феноменологическая теория сплошности оказалась совершенно недостаточной, потребовалась и в связи с этим очень широко развилась целая система изучения структуры кристаллов и других тел. Радиотехника и высоковольтная техника, которая сейчас уже достигла 200 000 в, настоятельно потребовали изучения механизма электрических явлений; под их влиянием развилась вся электронная физика. Развитие новых источников света точно так же стимулировало и непосредственно двигало развитие учения об излучении. Автоматизация, которая играет все большую и большую роль по мере укрупнения производств и объединения заводов в большие технические комбинаты, вместе с радио активно содействовала изучению фотоэффекта, полупроводников как узловой проблемы физики, появлению электронного микроскопа. Все это — большие области физики, созданные благодаря развитию соответственной техники. Наконец, необходимость использования бедных руд привела к учению о флотации, к учению об адсорбции.

Последнее, о чем я в этой связи хочу упомянуть, заключается в следующем. Любопытно, что и учение об атомном ядре в своем развитии теснейшим образом связано с прогрессом техники. Когда техника высоковольтных передач стала перед задачей перехода на постоянное напряжение и перед задачей выпрямления переменного тока, когда были созданы первые выпрямители на полмиллиона вольт, при помощи которых удалось разрушить атом лития, а затем целый ряд других, начался новый этап развития учения о ядре.

Очень любопытно, что выросшее на основе техники исследование атомного ядра в свою очередь уже начинает воздействовать на нее. Для изучения ядра необходимо перейти к миллионам вольт; создаются новые пути сверхвысоковольтной техники, которые поднимают ее на более высокую ступень. Таким образом, на этом примере мы ясно видим взаимообусловленность техники и научного исследования.

Перейду к ряду других наглядных подтверждений диалектического хода развития физики. Совершенно ясно виден переход количества в качество на определенном этапе количественных изменений. Переход от макроскопических величин к молекулярной теории выдвинул статистическую физику как совершенно новую форму закономерностей, проявившуюся в этой именно области. Переход к строению атомов вызвал появление новой квантовой механики. Дальнейший переход от атома к атомному ядру ведет к релятивистской квантовой механике, лишь неясные очертания которой уже виднеются, которой мы еще не знаем.

Точно так же не вызывает сомнений развитие в сторону синтеза противоположностей. Прерывность и непрерывность в современной картине синтезированы с некоторой высшей точки зрения, а не соединены как частицы и волны, электромагнитное поле и заряд.

Затем диалектически неизбежно непрерывное обобщение наших частных познаний о природе в более общую картину. Старое соединение теплоты и работы в понятие об энергии, обобщение этой энергии с массой в одно уже более общее понятие об энергии, включающее массу, объединение этой энергии с количеством движения в один тензор, объединение пространства и времени в четырехмерной картине и т. д.

Типичная черта диалектического описания явлений — это замена двух крайностей, «да» и «нет», целой непрерывной цепью промежуточных ступеней. Возьмем понятие о степени свободы, которая в начале этого периода рассматривалась чисто арифметически: степень свободы либо присутствует, либо ее совсем нет. Как известно, сейчас это понятие заменено непрерывным включением данной степени свободы от полного ее отсутствия вплоть до полного ее появления.

Нас интересовали металлы и изоляторы. Сейчас мы концентрируем свое внимание на полупроводниках, которые дают непре-

рывный мост между этими двумя крайностями. Только изучение полупроводников и позволяет понять два крайних случая: проводника и изолятора, которыми занималась физика прежних десятилетий. Пропасть между кристаллом и жидкостью также заполнилась богатым разнообразным содержанием — аморфными телами.

Наконец, последняя черта диалектического материализма, которую подчеркивает и Ленин в своей книге, — это неисчерпаемость материи. Материя, которая сначала составлялась из отдельных молекул, потом молекулы — из атомов, атомы — из ядра и системы электронов, ядра — из протонов и нейтронов, потом появились позитроны, нейтрино и т. д., развивается как неисчерпаемое богатство и разнообразие материи, а не как некоторая детская система камешков, из которых все построено.

Именно в этом же смысле я понимаю развитие статистических закономерностей, выражающих необычайную, необозримую сложность механики, переход от статистических закономерностей макрокосмоса к статистическим же закономерностям в микроскопическом мире атомов.

В такой же степени, как диалектический материализм, оправдывается и исторический материализм, может быть, политически наиболее важный: связь развития науки с развитием социальных отношений, связь не только с техникой в узком смысле слова, но и с состоянием производительных сил вообще, с социальными отношениями и с социальными условиями. К большому сожалению, наша марксистская критика в этом направлении почти ничего не сделала. А я думаю, что это один из важнейших вопросов. Например, не затронута такая задача, как выявление специфических черт развития науки в наших советских условиях. Исторически впервые наука поставлена в совершенно иные социальные условия, совершенно иные производственные отношения, наряду и во взаимодействии с наукой капиталистической. Мне не известно ни одного исследования, ни одной попытки разобраться в том, как изменение социальных отношений сказалось на развитии науки. Мне кажется, что эта задача чрезвычайно благодарная и чрезвычайно важная.

В заключение я хотел бы сказать несколько слов по вопросу о союзе материалистов-диалектиков с естествоиспытателями для борьбы с идеализмом. Не только от слова лица, но и от лица подавляющей массы всех физиков СССР я могу сказать, что мы всячески приветствуем такой союз. Я думаю, не только на словах, но и на деле мы уже показали, что стремимся к нему. Но утверждение того, что он уже осуществился, было бы, пожалуй, слишком оптимистично и весьма далеко от истины.

Мы охотно готовы бороться с идеализмом, и мы очень хорошо понимаем его опасность и его вред. Мы знаем, что на почве кризиса, на почве фашизма вырастает идеализм, который пытается истолковать каждый новый факт в свою пользу. Мы ясно видим



громадный вред его для науки и еще больший вред для политического развития: идеализм поддерживает капиталистическую систему, ослабляет борьбу за освобождение от ее гнета. И поэтому мы готовы всеми силами бороться с идеализмом. Но как с ним бороться? Я думаю, что бояться нового потому, что в нем может оказаться идеалистический душок, и потому топтаться на месте, — это метод, которым никого не победишь. Нужно идти вперед, нужно создавать свои теории в противовес идеалистическим теориям, свое понимание новых идей, подрывающее почву всяких идеалистических попыток. Нужно осветить наш путь фарами правильной теории — это лучший способ развеять мистический туман идеализма.

В замечательной книге Ленина «Материализм и эмпириокритицизм» мы найдем указания и для настоящего момента. Ленин знал физику так, как очень хорошо было бы знать ее многим современным ее критикам. Он знал диковинные с точки зрения «здорового смысла» вещи, о которых я говорил вначале. Но тем не менее ни одной строчки во всей его книге вы не найдете, в которой бы он утверждал, что Абрагам — идеалист, потому что он массу назвал кажущейся, или что Планк — идеалист, потому что он лучистой энергии приписал массу и считал ее лишь коэффициентом. Наоборот, каждое новое, расширенное, хотя и непривычное, понимание физических явлений Ленин воспринимает как блестящее подтверждение диалектического хода развития, как проявление громадного разнообразия неисчерпаемой реальной материи. Поэтому мы все время должны перестраивать свои взгляды. В этом достоинство, в этом главное преимущество диалектического метода. Ленин говорил, что физики в основном, конечно, материалисты, потому что они занимаются изучением внешнего мира. Считать, что этот мир нами же создан, что его реально не существует, и все-таки изучать его свойства — это довольно-таки неблагодарная задача для физики. Зачем ему заниматься физикой! Зачем изучать мир, когда вы сами можете построить его как хотите, — это гораздо интереснее. Ленин показал, что материя исчезла не в физике, а в слабых головах идеалистических философов.

Не странно ли, что в прямую противоположность Ленину некоторые и сейчас считают идеалистами отдельных активных физиков, стремящихся найти те новые представления, которые адекватно выразили бы свойства вне нас существующей материи. Что-то неладно! И Бор, и Шредингер, и Дирак, и Гейзенберг, и Френкель, и решительно все, кто стремится найти адекватное выражение свойств микрокосмоса атомного мира, все они идеалисты! Наоборот, их непривычные нам представления, в том числе и новое представление о причинности и принцип неопределенности, — блестящее подтверждение и обогащение содержания диалектического материализма. Когда в популярных работах и книжках они пускаются в философские обобщения своих научных

исканий, тогда, конечно, на философии некоторых из них сказывается воздействие тех социальных условий, в которых они находятся, и тех социальных задач, которые они выполняют сознательно или бессознательно. Я не хочу сказать, что все то, что говорит Гейзенберг, — святая истина и диалектический материализм. Это, конечно, не так. Но научная теория — это есть теория материалистическая, т. е. наиболее полное приближение к реальному, вне нас существующему миру.

Мне кажется, что и сейчас еще есть некоторые не вполне пережитые остатки старого. Такого продолжателя Ленина, который с того момента, до которого дошел 25 лет тому назад Ленин, в том же духе, как это делал Ленин, с таким же знанием физики и с такой же способностью диалектически толковать и оценивать новейшие пути ее развития шел бы в передовых рядах нашего знания, — такого продолжателя еще нет.

С большим удовлетворением мы видим, что в последнее время появляется стремление идти вперед, а не только критиковать старое. Признаки этого есть, и их нужно всячески приветствовать. С большой радостью принимая призыв к союзу, я хотел бы заключить союз не только на борьбу с идеализмом (это, конечно, необходимо), но и на движение науки вперед, в ту сторону, которая для нас наиболее существенна. Мы хотим познать природу для того, чтобы ее изменить, для того, чтобы ею овладеть, для того, чтобы рабство и угнетение были уничтожены не только на одной шестой части земной поверхности, для того, чтобы создать новое коммунистическое общество во всем мире. Это и есть на самом деле та главная пружина, которая всеми нами движет.

Для того чтобы это было, нам нужно захватить самим передовые позиции, нужно смело двигаться вперед, не боясь ошибок, потому что у нас есть прекрасное оружие, которое нас от них предохраняет. Наша теория строится не в безвоздушном пространстве, мы создаем теорию реально существующего мира, и реальные проявления этого мира, то отражение, которое он получает в наших ощущениях, дает нам метод проверки практикой. Опыт, практика дают нам гарантию того, что мы не построим абстрактной идеалистической схемы, а в своих теориях будем все больше приближаться к познанию действительного мира, который мы хотим узнать и который мы хотим переделать.

Статья опубликована в журнале «Под знаменем марксизма». № 4, 52—68, 1934, в выпуске, посвященном 25-летию со дня выхода в свет книги В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм». А. Ф. Иоффе последовательно проводит мысль о плодотворности применения метода диалектического материализма к решению общих проблем физики и о том, что идеи, высказанные В. И. Лениным, находят свое подтверждение в успехах и новых открытиях современной физики.

## ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ СЛОВО НА КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФИЗИКЕ ЯДРА

Мы заканчиваем работу нашей конференции. Я хочу в нескольких словах подытожить то, чего мы достигли.

Мы обсудили ряд проблем, и положение в каждой из них различно. Наиболее удовлетворительно положение с вопросом об образовании электрон-позитронных пар. В своем докладе А. И. Алиханов показал, что в этой области имеется весьма далеко идущее согласие между ожиданиями теории и экспериментом, причем это согласие не только качественное, но и количественное, достигающее весьма большой степени точности: эксперименты показывают, что все предсказания теории на самом деле количественно оправдываются.

Относительно  $\beta$ -распада положение таково: опыты сотрудников Алиханова обнаружили неожиданно точное согласие с теорией на чрезвычайно большом интервале скоростей, вплоть до самых больших. Нам было известно, что имеется приблизительное согласие, но сейчас оказалось, что точность совпадения настолько велика, что заставляет более серьезно подумать об основах этой теории.

С другой стороны, проф. Паули очень ясно показал, что, собственно, теоретические основы теории Ферми чрезвычайно сомнительны. Ее ни в коей мере нельзя рассматривать как настоящую теорию, ибо она содержит принципиальные логические противоречия.

Получается впечатление, что физическое понимание и построение современной теории  $\beta$ -распада на основе определенных физических предпосылок еще все-таки отсутствует, но что имеются прекрасные математические формулы, которые в широких пределах совпадают с действительностью настолько точно, что это само по себе получает большое значение. Из этого факта нужно исходить при дальнейших рассуждениях об истинной физической теории этого явления. Расхождение в конце спектра проще всего толковать как существование конечной массы нейтрино. Из обсуждения этого вопроса можно сделать вывод, что спад кривой спектра к нулю доказан довольно тщательными опытами, но сказать, что это значит, не так легко. Элементарное представление о том, что часть энергии затрачивается на собственную массу нейтрино, не соответствует экспериментальным данным. Можно думать, что здесь сказывается конечная масса нейтрино. Но это еще не есть решение вопроса.

Это особенно ясно было видно из сообщения проф. Пайерлса. Из него следует, что теория этого вопроса может видоизменяться в широких пределах. Наоборот, экспериментальные данные, полученные для ряда элементов, могут служить исходным пунктом для более правильного теоретического понимания этих отклонений. У нас нет еще готовой теории, с которой можно сравнивать

экспериментальные данные. Из них с некоторой степенью убедительности вытекает лишь наличие конечной массы у нейтрино, что представляется мне чрезвычайно существенным. Нейтрино было введено для того, чтобы не жертвовать законами сохранения энергии и импульса. Теперь нейтрино начинает получать реальные физические свойства и определенную массу, входит в число частиц с определенной нулевой массой.

На следующее место я бы поставил вопрос о космических лучах. Здесь было поставлено несколько дилемм. Очевидно, тут все сходится довольно хорошо вплоть до энергий в 100 Мэв, начиная с которых появляются столь резкие аномалии, что не может быть и речи о согласии с теорией. Возникает дилемма — или нужно видоизменить теорию, чтобы радиационные потери электронов уничтожались при определенных скоростях, или же ввести новую частицу, которая не обладала бы таким дефектом в отношении радиационных потерь. Здесь высказывался целый ряд соображений как в пользу одного, так и другого предположения. Сейчас мы стоим перед альтернативой — или теория радиационных потерь не верна при энергиях более 100 Мэв, или существует новая частица.

Другой вопрос, который чрезвычайно интересен в связи этим, — это вопрос о ливнях с тяжелыми частицами. Мне представляется особенно интересным в нашей конференции выяснение того, что это явление вовсе не такое редкое, как казалось. Доклад В. И. Векслера показывает определенную, правда довольно малую, вероятность явления. Было бы чрезвычайно интересно поставить задачу исследования этого явления более совершенными средствами, чем это было сделано в визуальных опытах Дмитриева. Нужно было бы дать ему количественную характеристику и выяснить его вероятность. Сейчас такими сведениями мы не располагаем, а потому выяснение этого вопроса представляется в высшей степени интересным и важным.

Очень интересно, что эти ливни с тяжелыми частицами, которые, как предполагал Гайзенберг, можно было сопоставить с лавинными ливнями, после доклада проф. Паули потеряли свою теоретическую базу. Дело в том, что теория Гайзенберга основывалась на одном из приближений теории Ферми, которое заведомо приводит к физически невозможной бесконечности. Поэтому чрезвычайно интересно знать, какие же это на самом деле ливни — образованные выбрасыванием большого числа частиц под влиянием ядра или ядром, превращения которого совершаются под действием космических лучей. Это две совершенно различные трактовки вопроса. В каждом случае можно до некоторой степени предвидеть, что следует ожидать, но экспериментальный материал ничтожен. Так что и здесь мы имеем перед собой актуальную и очень важную экспериментальную задачу.

Касавшаяся нейтронов дискуссия производит весьма отрадное впечатление, поскольку общие основы теории Бора, по-видимому,

во всех пунктах подтверждаются. Правда, нужно сказать, что здесь совпадение пока качественного характера, но, как показал ряд докладов, это совпадение охватывает решительно все стороны явления, поэтому имеется достаточно оснований, чтобы начать сопоставление только что прослушанных нами теоретических выводов. Здесь имеется настолько хорошее согласие с экспериментом, что можно приступить к более детальной количественной проверке отдельных положений теории; в частности, я хочу коснуться вопроса о распределении протонов при столкновении с нейтронами. Этот вопрос подробно обсуждался, значение его выяснено, это — одно из средств определить характер поля на малых расстояниях от протона и узнать силы взаимодействия. Здесь, как и в вопросе о  $\beta$ -распаде, наметились методические пути и необходимость тщательного изучения рассеяния нейтронов. Есть все основания думать, что этот вопрос будет окончательно решен.

У меня сложилось такое впечатление, что наблюдения, произведенные в камере Вильсона, требуют более детального изучения, для того чтобы можно было точно установить, в каких пределах экспериментальные результаты соответствуют реальным физическим явлениям и в каких направлениях они могут еще находиться в зависимости от несовершенства самой методики.

Наконец, я коснусь вопроса о ядерных силах. Совершенно ясно, что состояние этого вопроса наиболее неудовлетворительно по сравнению с остальными вопросами, которые мы рассматривали на конференции. Как следует из доклада И. Е. Тамма о ядерных силах, единственное, что можно сказать, — в ядре действуют не электрические силы. Я лично думаю, что даже и этого сказать нельзя, но это мое личное мнение. Если даже это и так, то все же этого мало; если принять во внимание, как много труда было положено для установления природы ядерных сил, становится совершенно ясно, что здесь существует наибольшая диспропорция между затраченными математиками и теоретиками трудом и полученными результатами. В этом вопросе сколько-нибудь твердого результата практически еще нет.

Последнее, что я хотел бы отметить, это то, с чего мы, собственно, начали. Я хочу сказать о той технической базе, которой обладает советская физика в области атомного ядра. Мы начали свою конференцию с блестящего доклада К. Д. Синельникова, который показал, что физика вырастает в большую технику. Мы с вами слушали доклад, по существу, о крупных инженерных сооружениях, которые привели к определенным положительным результатам. Второй доклад, В. Н. Рукавишников, показал, что и в области циклотронов — другого метода, который дал нам орудие для изучения ядра, — также имеются определенные результаты. Несмотря на это, конечно, совершенно очевидно, что наша техническая база, ограничивающаяся этими двумя установками, совершенно не соответствует тем большим задачам и тому раз-

маху изучения атомного ядра, который выявился на данной конференции.

Действительно, мы заслушали 30 докладов, весьма принципиальных и очень обширных по своему содержанию; за каждым из них скрывается громадная работа, тщательно проведенная рядом исследователей. В нашем Союзе около 100 человек работает непосредственно в области атомного ядра. Значительная часть тех докладов, которые нами заслушаны, имеет фундаментальное значение и показывает широкое развитие нашей науки. И я полагаю, что наша техническая база не соответствует масштабу работы. Совершенно очевидно, что продуктивность работы будет абсолютно иной, когда сооруженные приборы будут пущены в ход; они, по существу, до сих пор только еще готовятся к действию. Все наши основные институты должны получить достаточно прочную техническую базу для своей работы. Это, мне кажется, одно из важнейших условий для развития советской ядерной физики. А то обстоятельство, что перспективы для такого развития весьма благоприятны, является совершенно бесспорным. Я думаю, не будет чрезмерным оптимизмом, если я оценю заслушанные на конференции доклады как весьма существенный вклад в науку. У нас имеется весьма серьезная и широко развернутая работа, опирающаяся, однако, на крайне узкую техническую базу. Отсюда ясный вывод, что эту базу нужно расширить, и тогда можно быть совершенно уверенным, что наша работа получит еще более широкий размах.

Надо отметить, что наше правительство всеми силами идет па помощь науке — и в нашей очень узкой области науки, и во всех остальных ее областях. Такой активной, действенной помощи, конечно, никто, кроме нас, не имеет; на работы по атомному ядру отпущено много и много миллионов. Конечно, еще некоторые вложения в это дело необходимо будет сделать, но и от нас самих зависит многое. Мы должны лучше использовать и правильно расставить наши собственные силы и, подготовив техническую базу, на ней построить всю научную работу, а конференция этому в высокой степени поможет, потому что она подвела общие итоги всему, что было сделано.

В результате работ нашей конференции мы получили достаточно ясную картину о работах по изучению ядра физиками Советского Союза, а также достаточно ясное представление о положении важнейших вопросов, над которыми мы работаем.

С другой стороны, в ходе обсуждения в каждой из областей ядерной физики наметились наиболее важные вопросы, на которых должна быть сосредоточена и экспериментальная и теоретическая работа. Следовательно, наша конференция дает определенные основания для планового построения работы советской физики как в отношении ее тематики, так и распределения сил, и соотношения теоретической части работы с экспериментальной.

Из недостатков некоторых заслушанных нами докладов я пре-

жде всего отметил бы недостаточный анализ возможных ошибок, недостаточный анализ самой методики. Необходима самая придирчивая критика как своих, так и чужих результатов со всех точек зрения. Я думаю, что из всех наших институтов эта критика, этот анализ работы в наибольшей степени присущ Ленинградскому физико-техническому институту, где давно имеется сплоченная группа работников, постоянно дискутирующих эти вопросы. Такого рода более детальная, более критическая дискуссия во всех институтах совершенно необходима для того, чтобы нашу работу поднять на более высокий уровень.

Вот те выводы, которые можно сделать из работы нашей конференции.

Разрешите теперь закрыть конференцию и выразить надежду, что к следующей конференции каждый из нас учтет уроки, которые можно было извлечь из нашей дискуссии.

Заключительное слово, произнесенное А. Ф. Иоффе в Москве по окончании работы Всесоюзной конференции по физике атомного ядра, было опубликовано в Изв. АН СССР, сер. физ., вып. 1, 2, 249, 1938.

В работе конференции приняли участие видные советские и зарубежные физики, в том числе В. Паули и Р. Пайерлс. Председательство А. Ф. Иоффе на заседаниях конференции — свидетельство интереса его к важнейшей проблеме физики 30—50-х годов и проявление уважения к его деятельности по постановке исследований по физике ядра в Физико-техническом институте и в Советском Союзе в целом.

Краткое резюме А. Ф. Иоффе возвращает нас ко времени, когда еще не было экспериментально установлено отсутствие массы покоя нейтрино, и даст представление о круге проблем, обсуждавшихся на конференции.

# ПОЛУПРОВОДНИКИ

## ПОЛУПРОВОДНИКИ В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ И ТЕХНИКЕ

Еще совсем недавно электротехника применяла, а физика изучала лишь предельные по своим электрическим свойствам материалы: хорошо проводящие металлы или непроводящие ток изоляторы.

В начале XX в. удалось установить, что в металле ток переносится электронами, а ничтожный ток, наблюдаемый в изоляторах, имеет электролитический характер. Однако после первых успехов электронной теории металлов и ионной теории диэлектриков исследование натолкнулось на ряд трудностей, которые удалось разрешить только с помощью новой квантовой механики на протяжении последнего десятилетия.

Главнейшей трудностью в теории металлов были их тепловые свойства. С одной стороны, электроны свободно перемещаются в металле, перенося электрический ток, выравнивая температуру, создавая термоэлектродвижущие силы. Это значит, что в тепловом движении электроны участвуют как самостоятельные частицы, движущиеся среди атомов металла. Нагревая металл, нужно сообщить энергию не только его атомам, но и свободным электронам. Число их, судя по оптическим свойствам металлов, равно числу атомов. Электроны должны получить столько же тепловой энергии, сколько получил бы газ, состоящий из такого же числа молекул.

На нагревание одного грамм-атома твердого тела на  $1^{\circ}\text{C}$  требуется около 6 кал; на нагревание грамм-атома газа — 3 кал. Естественно было бы ожидать, что на нагревание грамм-атома металла на  $1^{\circ}\text{C}$  потребуется 9 кал в отличие от непроводящих тел, теплоемкость грамм-атома которых составляет 6 кал. В действительности, однако, теплоемкость металлов существенно не отличается от теплоемкости диэлектриков.

Выход из этих противоречий, как и из ряда других трудностей, был найден благодаря квантовой механике. Как в отдельном атоме электроны могут занимать только строго определенные



квантовые состояния (чем и объясняется, например, появление в спектре газов резких спектральных линий), так и в целом кристалле существуют строго ограниченные квантовые состояния, в которых могут находиться электроны. Как в атоме, так и в кристалле не может быть двух электронов в одном и том же квантовом состоянии. Естественно, что прежде всего электронами заполняются состояния с наименьшей энергией. Подсчет показывает, что при обычных температурах, когда средняя энергия теплового движения атомов составляет около  $0.03$  эв ( $1$  эв — это энергия, которую приобретает электрон, пройдя в электрическом поле разность потенциалов в  $1$  в), электроны занимают все квантовые состояния с энергиями от нуля до  $5-10$  в. Поэтому энергия теплового движения  $0.03$  эв мало влияет на среднюю энергию электронов, хотя последние и находятся в тепловом равновесии с атомами металла.

Квантовая теория установила также, чем обусловлена разница между проводниками и изоляторами. В металлах число возможных квантовых состояний значительно больше, чем число электронов. Поэтому, когда в металле создается электрическое поле, электроны имеют возможность изменять направление своего движения, переходя в те квантовые состояния, в которых их скорость направлена в сторону действующей на них электрической силы. Электроны могут также получать от электрического поля работу, переходя в состояния с более высокой энергией и отдавая потом избыточную энергию металлу, — так происходит нагревание металла при прохождении тока.

Диэлектрики отличаются от металлов не меньшим числом электронов — их столько же, если не больше. Они не проводят ток только потому, что число квантовых уровней в них равно числу электронов и свободных уровней нет. В диэлектрике в электрическом поле электрон не может изменить направление своего теплового движения, не может увеличить свою скорость, так как при этом он должен был бы перейти в новое квантовое состояние, которое уже занято другим электроном. Поэтому поле не может изменить тепловое движение электронов и, следовательно, не может создать электронный ток. Такова физическая картина идеального изолятора.

Те состояния, которые мы рассматривали, были нормальные состояния электронов. В отдельном атоме мы знаем и другие, так называемые возбужденные состояния. Поглотив определенную энергию падающего на атом света или встречного электрона, электрон может перейти в атоме на одно из квантовых состояний повышенной энергии. Возвращаясь обратно в нормальное состояние, электрон отдает избыток своей энергии другому атому или испускает его в виде электромагнитной световой волны (фотона).

Аналогичными свойствами обладают и электроны в твердом кристаллическом теле. Кроме системы нормальных уровней, которые в изоляторе заняты электронами, всегда существуют системы

возбужденных уровней со значительно большей энергией. Только электроны, которые получают достаточную энергию, могут перейти в эти состояния. Источником этой добавочной энергии может быть тепловая энергия или поглощенный свет (фотон с энергией  $h\nu$ , где  $\nu$  — частота световых колебаний, а  $h$  — постоянная Планка, равная  $6.61 \cdot 10^{-27}$  эрг · сек.). Чем больше разность энергий возбужденных и нормальных уровней, тем меньше число электронов при данной температуре получает возможность перейти в новые квантовые состояния. При комнатной температуре средняя энергия теплового движения равна 0,03 эв. Если наименьшая энергия, необходимая для перехода в новые состояния, составляет, например, 1 эв, то лишь ничтожная часть электронов может получить такую энергию. При 2 эв их еще меньше. Можно утверждать, что во всех диэлектриках, в которых разность энергии между нормальными и возбужденными состояниями больше 0,02 эв, все электроны остаются в нормальных состояниях. Следовательно, все такие диэлектрики не обладают электронной проводимостью. Но поглощение света достаточной частоты (2 эв соответствуют желтому свету  $\lambda \approx 600$  мкм) может все же перевести нормальные электроны на свободные уровни, где они будут участвовать в прохождении электрического тока. Это явление называется внутренним фотоэффектом, а созданный под влиянием света ток — фотоэлектрическим током. Определив наименьшую частоту света фотоэффекта, мы можем узнать энергию, необходимую для перехода из нормальных условий в возбужденные.

Помимо теплового движения и света, электронная проводимость диэлектрика может быть вызвана и химическими примесями. В кристаллической решетке, состоящей из одинаковых ионов или атомов, часто наблюдаются нарушения правильной структуры. Иногда отсутствуют отдельные ионы; иногда ионы решетки оказываются замещенными ионами других элементов или другой валентности; в кристаллах могут размещаться и добавочные атомы, включенные в нормальную решетку.

Во всех этих случаях, кроме нормальных квантовых уровней кристалла, появляются добавочные уровни примесей с энергией, отличной от энергии электронов решетки.

Часто энергия электронов примеси, занимая промежуточное положение между энергией нормальных и возбужденных уровней, оказывается ближе к свободным состояниям, чем энергия нормальных электронов. Если тепловое движение не дает нормальным электронам достаточной энергии для перехода в свободные состояния, то для примесей тепловой энергии может оказаться достаточно, чтобы перевести часть электронов на свободные уровни и вызвать проводимость кристалла.

Примеси могут повлиять на электронное равновесие и в другом направлении: часть нормальных электронов кристалла может перейти на уровни энергии, создаваемые примесями, освободив соответственное число нормальных состояний.

Это обстоятельство также сообщает диэлектрику способность проводить электрический ток. Рассмотрим подробнее, как совершается в этом случае движение электронов. Когда электрон, находившийся прежде в нормальном состоянии, переходит в одно из состояний, внесенных примесями, и закрепляется там, то не только появляются свободные состояния с определенной энергией и скоростью, но в то же время в кристалле с уходом отрицательно заряженного электрона в определенном месте остается избыток положительного заряда. Этот заряд может потом привлечь один из соседних электронов, на месте которого окажется тогда избыток положительного заряда. Такие переходы совершаются под влиянием теплового движения в самых разнообразных направлениях. Участок кристалла, где имеется недочет электрона, или, что то же, избыток положительного заряда, перемещается самым хаотическим образом, подобно электрону, участвующему в тепловом движении. Мы получаем впечатление, как будто самый положительный заряд движется в кристалле, тогда как на самом деле движутся электроны, замещающие свободные места. Когда в диэлектрике создано электрическое поле, то замещение свободного места происходит преимущественно при помощи тех электронов, которые направляются к положительному заряду электрического поля, т. е. в направлении от отрицательного полюса к положительному, а свободное место перемещается при этом на место ушедшего электрона, т. е. от положительного полюса к отрицательному, по направлению, в котором двигался бы положительный заряд, если бы он мог перемещаться. Таким образом, свободное место, оставленное электроном, перешедшим на атомы примеси или в свободные возбужденные состояния, мы можем уподобить свободному положительному заряду.

Движение электронов в диэлектрике может иметь двоякий характер.

1. Те электроны, которые перешли под влиянием тепла или света в свободные возбужденные состояния, получают возможность перемещаться внутри диэлектрика, переноса ток и тепло.

2. Оставшиеся после удаления электронов свободные места среди нормальных квантовых состояний замещаются соседними электронами так, как будто движется свободное место со своим положительным зарядом. Часто этот второй механизм тока называют током замещения. Мы будем его называть позитронным током (хотя свободные места имеют лишь частичное сходство с позитронами) в отличие от электронной проводимости первого рода.

Разумеется, в том же диэлектрике одновременно может существовать проводимость первого и второго рода в любых пропорциях.

Как же узнать в каждом данном случае, с каким механизмом проводимости мы имеем дело? Простейший прием — определить

знака термоэлектродвижущей силы. Если мы нагреваем конец кристалла, обладающего электронной проводимостью, то здесь создается большее число подвижных электронов, получивших большую кинетическую энергию. Электроны будут уходить из этого конца в большем количестве, чем приходят туда более медленные электроны из холодного конца, где их меньше. Нагретый конец заряжается положительно, холодный — отрицательно, пока электрическое поле в диэлектрике не скомпенсирует этого избыточного ухода электронов, перегоняя обратно электроны из отрицательного (холодного) конца в более теплый. Таким образом, в диэлектрике с электронной проводимостью нагретый конец оказывается длительно заряженным положительно по отношению к холодному.

При позитронной проводимости, наоборот, положительные свободные места уходят из нагретого конца быстрее, чем они приходят из холодного. Замещающие их электроны зарядят нагретый конец отрицательно.

Другой прием определения механизма проводимости — наблюдение тока в магнитном поле (эффект Холла). Электрический ток отклоняется в магнитном поле в определенную сторону перпендикулярно как к направлению тока, так и к направлению магнитного поля. В эту сторону отклоняются заряды, переносящие ток. Если это электроны, то эта сторона диэлектрика заряжается отрицательно. Если же перемещаются свободные положительные места, то та сторона, в которую отклонился ток, заряжается положительно.

Химические примеси, введенные в диэлектрик, могут вызывать проводимость как первого, так и второго рода в зависимости от того, являются ли они поставщиками электронов на свободные уровни или же вносят в кристалл уровни, на которых могут закрепиться электроны нормальных уровней.

Это различие двух родов тока оказалось весьма важным не только для исследования проводимости, но и для технических применений электронных проводников.

Исходя из сказанного, мы легко можем понять основные свойства этих проводников.

1. Чистые диэлектрики, в которых разность между энергией нормальных и возбужденных состояний превышает 1 эв, обладают очень малой проводимостью. Но стоит ввести в них некоторое количество примеси, как их проводимость возрастает в тысячи и миллионы раз.

2. Примеси, легко отдающие свои электроны (например, атомы металла), вызывают электронную проводимость; примеси же, легко присоединяющие электроны (кислород, сера, хлор), вызывают позитронную проводимость.

3. С повышением температуры электропроводимость резко возрастает и становится, наоборот, неизмеримо малой вблизи температуры абсолютного нуля.

4. Начиная с некоторой частоты свет при поглощении диэлектриком создает фотопроводимость.

5. Диэлектрики, прозрачные для всех видимых лучей (например, алмаз, каменная соль, кварц), оказываются изоляторами. В самом деле, наибольшая частота видимого фиолетового света соответствует фотонам в 3 эв.

Если этот свет еще не поглощается, это значит, что разность между нормальными и возбужденными уровнями энергии превышает 3 эв, а при этих условиях при комнатной температуре только те электроны могли бы перейти на свободные уровни, энергия которых в 100 раз больше средней (0.03 эв). Таких электронов неизмеримо мало.

6. Введением примесей можно повысить электропроводимость кристаллов.

Но одновременно появляется и окраска, так как свет меньшей частоты может теперь поглощаться, переводя электроны примесей на свободные уровни или, наоборот, переводя нормальные электроны кристалла на уровни энергии, принадлежащие примесям.

7. Материалы, непрозрачные для всех видимых лучей, вплоть до красных (фотонов с энергией 1.5 эв), наоборот, часто обладают значительной проводимостью, в особенности если в них имеются примеси. Возможно, впрочем, поглощение света и без фотоэффекта.

Таким образом, наряду с металлами и изоляторами, мы изучаем сейчас громадное разнообразие электронных проводников промежуточного типа — так называемых полупроводников.

Интерес к ним возрос не только потому, что, воздействуя на них светом, теплом, сильными электрическими полями или вводя примеси, мы можем в самых широких пределах изменять их электрические свойства и изучать поведение электрических зарядов в твердом теле. За последние 10 лет полупроводники получают все более растущие технические применения благодаря двум присущим им свойствам: выпрямлению и появлению электродвижущих сил при освещении. Эти свойства используются в выпрямителях переменного тока и твердых фотоэлементах.

Выпрямитель из закиси меди состоит из медной пластины, на которой окислением при температуре около  $1000^{\circ}\text{C}$  создается хорошо проводящий слой закиси меди. При этом между медью и закисью появляется слой плохо проводящей закиси толщиной в миллионные или сотысячные доли сантиметра. Различие в проводимости обоих слоев закиси вызвано тем, что в проводящем слое имеется большой избыток кислорода (до 1%), который снижает его удельное сопротивление до  $100\text{ ом}\cdot\text{см}^2$ , тогда как топкий прилегающий к меди слой чистой закиси обладает удельным сопротивлением около  $10^{10}\text{ ом}\cdot\text{см}^2$ .

Сопротивление такой системы резко меняется в зависимости от направления тока. При одинаковой приложенной к выпрями-

тению разности потенциалов в 1, 2 или 3 в мы наблюдаем токи в несколько ампер, когда медь служит отрицательным электродом, т. е. когда электроны идут из меди сквозь тонкий слой чистой закиси в насыщенную кислородом и хорошо проводящую закись меди. В обратном направлении при тех же напряжениях в 1—3 в токи составляют лишь несколько миллиампер. Первое направление тока называется пропускным, второе — запиорным, а тонкий слой закиси получил название запиорного слоя. Отношение пропускного тока к запиорному при одинаковых напряжениях носит название коэффициента выпрямления. В хороших технических выпрямителях оно достигает 10 000.

Существовало несколько объяснений работы выпрямителя. Все они исходили из того, что электроны легче проходят сквозь запиорный слой, когда они идут из металла, где их много, чем из закиси меди, где их мало. Прохождение электронов мы с Я. И. Френкелем приписывали тому, что тонкий запиорный слой становится прозрачным в сильных электрических полях, создаваемых уже напряжением в 1 в. В самом деле, толщина этого слоя всего несколько миллионных сантиметра, следовательно, поле достигает нескольких десятков или сотен тысяч вольт на 1 см. Пропускной ток ван Гель приписывает вырыванию электронов из металла этим сильным полем.

Однако при ближайшем изучении других выпрямителей все эти представления оказались неверными. В лаборатории Ленинградского физико-технического института были созданы искусственные выпрямители, состоящие из полупроводника, нанесенного на него испарением в пустоте тонкого непроводящего слоя и металлического электрода. Позже такие же опыты были развиты в Германии.

Оказалось, что при толщине запиорного слоя около одной миллионной сантиметра коэффициент выпрямления достигает наибольшего значения; при этом запиорный слой может состоять из любого непроводящего материала — кварца, шеллака, тонкой слюды. Самым неожиданным образом выяснилось, что знак выпрямления меняется в зависимости от применяемого полупроводника. В закиси меди, селене, серпистой меди пропускной ток течет, когда металл служит катодом. В окиси цинка, окиси алюминия, наоборот, пропускной ток наблюдается, когда металл служит положительным полюсом. Первые материалы являются полупроводниками с позитронной проводимостью, а вторые — обладают электронной проводимостью.

Таким образом, знак выпрямления зависит не от металла и не от свойств запиорного слоя, а от механизма проводимости полупроводника. На границе с металлом всегда имеется достаточное число как электронов, так и свободных положительных мест при любом направлении тока. Наоборот, на границе между полупроводником и запиорным слоем условия перехода зарядов резко зависят от направления тока.

Если ток в полупроводнике переносится электронами, то сильный ток может поддерживаться только в том случае, когда полупроводник служит катодом и электроны из него поступают через запорный слой в металл. При обратном направлении тока электроны, уходя от пограничного слоя, создают здесь плохо проводящую прослойку, запирающую ток.

Когда мы имеем полупроводник, в котором перемещаются свободные положительные места (такими, как оказалось, и являются материалы технических выпрямителей — закиси меди, селен, сернистая медь), для пропускного тока полупроводник должен быть анодом. Тогда он доставляет к границе запорного слоя положительные заряды, переносящие ток в отрицательно заряженный металл.

Существуют полупроводники, в которых мы можем по произволу создавать электронную или позитронную проводимость, вводя в них те или другие примеси. В этих случаях и знак выпрямления меняется с изменением механизма проводимости. В тесной связи с твердыми выпрямителями стоят и твердые фотоэлементы. Здесь также обязательным условием является присутствие запорного слоя, но, кроме того, необходимо, чтобы материал фотоэлемента обладал внутренним фотоэффектом. По отношению к знаку фотоэлемента, как и в случае выпрямления, сначала существовали неправильные представления. Казалось, что вырванные светом электроны, проникая сквозь запорный слой, заряжают металл отрицательным зарядом. Этот знак и наблюдался в первых технических фотоэлементах из закиси меди и селена, в которых, как мы уже знаем, имеет место ток замещения. Оказалось, однако, что в новых фотоэлементах из сернистого таллия, созданных в ЛФТИ, знак фототока обратный — металл заряжается положительно. Тот же знак наблюдался в фотоэлементах из сернистого серебра, осуществленных в Киеве в Физическом институте Украинской Академии наук. В обоих случаях мы имеем дело с электронным механизмом проводимости. Впрочем, сернистый таллий можно сделать и проводником с положительными зарядами, насытив его избытком серы; тогда при освещении металл заряжается отрицательно.

Разница между двумя типами фотоэлементов из сернистого таллия не ограничивается знаком фотоэффекта. В то время как при обычном знаке фотоэффекта чувствительность фотоэлемента к свету имеет такие же значения, как и в ранее известных элементах из закиси меди и селена, а именно несколько сот микроампер на один люмен падающего света, сернистоталлиевые фотоэлементы с положительным знаком фотоэффекта дают до 8000 мка на люмен и оказываются чувствительными к невидимым инфракрасным лучам.

Каким же образом свет, вырывающий отрицательные электроны, может заряжать металл положительными зарядами? Это легко понять, если вспомнить, что, вырывая электроны из полосы

нормальных условий, свет освобождает там свободные места, создает положительно заряженные подвижные участки, на которые и переходят электроны из металла. Отдавая же свои электроны полупроводнику, металл заряжается положительно.

Если бы не существовало запорного слоя, фотоэлектрический ток не мог бы создать заметной разности потенциалов между металлом и полупроводником. Включение между ними такого тонкого слоя, который, пропуская электроны, обладает в то же время достаточно большим сопротивлением, обеспечивает разность потенциалов, равную произведению силы фототока на сопротивление запорного слоя.

Таким образом, твердый фотоэлемент с запорным слоем создает не только ток, но и электродвижущую силу, достигающую 0.3 в; следовательно, такой фотоэлемент является источником электрической энергии, получаемой за счет энергии поглощенного света.

Каков же кпд фотоэлемента? В фотоэлементах из закиси меди и селена он составляет для солнечного света несколько сотых и до одной десятой процента. В фотоэлементах из сернистого таллия кпд приближается к 1%. При ярком освещении фототоки здесь достигают 0.1—0.2 а. Но даже кпд в 1% не дает еще оснований для практического использования солнечной энергии. На 1 м<sup>2</sup> поверхности солнце дает до 1 квт мощности; следовательно, фотоэлемент площадью в 1 м<sup>2</sup> в солнечные дни мог бы создавать ток мощностью в 10 вт. Этот выход энергии не может оправдать громадной стоимости такого фотоэлемента, соответствующего 1000 обычных элементов.

Но если на данном этапе фотоэлементы не могут быть использованы для превращения солнечной энергии в электрическую, то нельзя отрицать такой возможности в будущем. Дальнейшее развитие фотоэлементов может довести их кпд до нескольких процентов. С другой стороны, стоимость их изготовления и устойчивость по отношению к атмосферным влияниям могут быть настолько улучшены, что фотоэлемент с запорным слоем может оказаться выгодным. Не надо забывать, что количество солнечной энергии чрезвычайно велико: 1 га получает 10 000 квт мощности, а 5% от них составляет 500 квт — энергию, достаточную для большого завода. Несомненно одно, что достижение этой цели потребует еще преодоления громадных трудностей.

Энергетическое использование солнечных лучей — дело будущего. Но и сейчас фотоэлементы широко применяются в технике; звуковое кино осуществляется при помощи фотоэлементов. Возможно, что фотоэлементы с запорным слоем благодаря своей простоте, отсутствию паразитных токов и шумов, отсутствию высоких напряжений получают преимущество перед применяемыми сейчас вакуумными фотоэлементами с вторичным усилением. Далее, фотоэлементы с успехом применяются для всевозможных случаев сигнализации, для автоматического счета, сортировки,



контроля производства. Возможно, что они найдут применение также в телевидении и в самых разнообразных измерительных приборах.

Первая система передачи изображений А. Корна была основана на внутреннем фотоэффекте селена.

Во многих кристаллах из полупроводников освещение создает фотоэлектродвижущую силу, достигающую нескольких сотых вольта и без запирающего слоя, роль которого играет сопротивление самого кристалла.

И. К. Кипкоин и М. М. Носков обнаружили, что, помещая такие вещества в сильное магнитное поле, можно наблюдать эдс, достигающие 20 в, правда, при большом сопротивлении образца и при слабом фототоке. Практического применения эти явления пока не получили.

Мало еще использованы большие термоэлектродвижущие силы, возникающие между двумя полупроводниками с разными температурами. В то время как в металлах  $1^\circ$  разности температур создает эдс порядка сотысячных вольта, в полупроводниках мы получаем до одной тысячной вольта. Знак термоэлектродвижущей силы, как мы уже видели, зависит от механизма проводимости. Соединив два полупроводника с противоположными механизмами тока, мы получаем сумму эдс, когда нагреваем место их соединения.

Термоэлемент является прибором, превращающим тепловую энергию в электрическую. Благодаря неизбежным процессам теплопроводности по тем проводам, которые несут ток, кпд термоэлементов гораздо меньше, чем в тепловых машинах. Термоэлементы из металлов дают не более 1—2% электроэнергии. Среди полупроводников можно подобрать такие, которые дают до 4%, и эту величину, по-видимому, можно будет еще увеличить. Даже при кпд в 10% термоэлементы не могут конкурировать с машинами, но благодаря крайней простоте, отсутствию движущихся частей, компактности для определенных целей термоэлементы могут получить значение не только как измерители температуры и лучистой энергии, но и как источники тока.

Техническое применение полупроводников еще в будущем. Это — один из наиболее молодых и быстро растущих участков технической изобретательности. Наша промышленность уже давно производит выпрямители для целей автоблокировки. Сейчас по разработанному ЛФТИ методу ставится производство высокоточных выпрямителей на сотни и тысячи ампер для электролиза, зарядки аккумуляторов, производства алюминия, магния и для других целей, не требующих высоких напряжений. Ставится производство селеновых выпрямителей, имеющих определенные преимущества при низких температурах и в измерительной аппаратуре. Наконец, в ЛФТИ разработаны новые серпомедные выпрямители с габаритами и стоимостью в десятки раз меньше, чем у других типов.

Селеновые фотоэлементы производятся в Харькове и Ленинграде в количестве нескольких десятков тысяч в год. Серьезные фотоэлементы проходят еще стадию испытаний, после чего можно будет приступить к постановке производства и к широкому внедрению их в практику.

Для физической теории полупроводники имеют исключительное значение. Здесь открывается возможность изучить электрические и оптические свойства твердого тела, квантовые состояния электронов, их связь с атомами вещества. И, действительно, современные оптика и электроника твердого тела строятся на изучении полупроводников. Растущий технический опыт обогащает теорию, а теория в свою очередь открывает новые пути улучшения и применения полупроводников. Примерами этого могут служить фотоэлементы и выпрямители, технический опыт изготовления которых открыл явление запирающего слоя и различие знака выпрямления. А квантовая теория, объяснив связь знака с механизмом выпрямления, указала путь рационального усовершенствования фотоэлемента и выпрямителя.

В области полупроводников наглядно проявляется взаимная обусловленность теории и практики. Полупроводники представляют поэтому благодарное поле изучения для технической физики, для изобретательства и для автоматизации производственных процессов. Перед советской физикой, перед лабораториями, которые заняты исследованием полупроводников, стоит задача быть инициаторами прогресса в этой области.

Статья опубликована в журнале «Природа», № 4, 13—19, 1939 (см. также: Электричество, № 6, 5, 1939).

Она написана до открытия транзисторов и до создания последовательной теории выпрямляющего действия контакта полупроводник—металл и явлений в  $p-n$  переходах. В становлении этой теории существенную роль сыграли работы Д. И. Блохинцева, Б. И. Давыдова и С. И. Пекара. Упомянутые в статье исследования А. Ф. Иоффе и Я. И. Френкеля по туннельной теории выпрямления оказались, как выяснилось в конце 50-х годов, приложимыми к описанию туннельных диодов Л. Есаки.

Предложенный в статье А. Ф. Иоффе термин «полупроводниковая проводимость» в литературе не прижился, и вместо этого говорят о «дырочной проводимости».

Предвидение А. Ф. Иоффе роста кпд фотоэлементов на полупроводниках полностью оправдалось — кремниевые солнечные батареи обеспечивают питание бортовой аппаратуры искусственных спутников Земли и космических кораблей. Прав оказался А. Ф. Иоффе и в оценке будущего, которое ожидало полупроводниковые термоэлементы. Успехи в их техническом использовании получены благодаря работам А. Ф. Иоффе и его школы.

## ПОЛУПРОВОДНИКИ В ФИЗИКЕ И ТЕХНИКЕ

До недавнего времени физика изучала, а техника применяла либо полностью проводящие металлы, либо совсем не проводящие электрический ток изоляторы. В свете современных представлений об электрических свойствах твердого тела металлы и изоляторы

представляются как крайние случаи. В металлах от каждого атома уже отделен электрон, а все вместе они переносят электрический ток, выравнивают температуру внутри металла. При сильном нагреве или при освещении ультрафиолетовым светом электроны вырываются из металла наружу. Все эти свойства металла широко использованы современной техникой. Медные, алюминиевые и железные провода, теплопередачи через металлические стенки котлов, радиолампы с накалимым катодом, фотоэлементы звукового кино давно уже вошли в обиход техники.

Давно уже применяются в технике и изоляторы, в которых почти отсутствуют свободные электроны, способные переносить электрический ток. Для изоляторов удельное сопротивление электрическому току выражается десяти- и пятнадцатизначными числами, а для металлов оно выражается лишь стотысячными долями ома. Между этими двумя крайностями мы находим в природе громадное многообразие промежуточных полупроводящих материалов (графит, селен, ряд окислов, сернистых соединений и т. п.).

До недавнего времени из полупроводников применялись только электролиты, которые встречаются в аккумуляторах и электрохимических производствах, теперь же полупроводники находятся в центре внимания электрофизиков. Исследования этих материалов расширяют наши познания об электричестве, а результаты их интенсивно внедряются во все области электротехники. Появились твердые выпрямители переменного тока, твердые фотоэлементы, оксидная изоляция, стабилизаторы напряжения, предохранители высоковольтных сетей от перенапряжений. Автоматика и телеуправление производственными процессами широко используются полупроводниками. Исследованию полупроводников и их применению посвящена значительная часть работ Ленинградского физико-технического института Академии наук СССР.

Чтобы полностью оценить значение возникших в этой области проблем, следует напомнить эволюцию наших представлений об электричестве. В XVIII в. наши сведения об электричестве черпались из явлений, возникающих при электризации тел трением. Электричество и магнетизм представлялись «электрической и магнитной жидкостями». А так как электричество проявлялось либо во взаимном отталкивании, либо во взаимном притяжении, то пришлось допустить существование двух противоположных «электрических жидкостей» и точно так же двух противоположных «магнитных жидкостей». Наряду с этим существовала и гипотеза одной «электрической жидкости», а противоположные ее действия объяснялись в одном случае избытком этой жидкости против какой-то нормы, в другом случае, наоборот, недостатком ее в теле.

Главными материалами, на которых проводились исследования явления электризации тел трением, были мех кошки, амальгамированная кожа и бузиновые шарiki. Технические применения электричества ограничивались электромашинами и гальваническими элементами.

Следующий этап электрофизики связан с открытиями Эрстеда и Ампера, установивших тесную связь между электрическим током и магнетизмом. Вслед за этим Фарадей открыл электромагнитную индукцию. Между идеями Ампера и Фарадея существовала близкая связь: оба изучали взаимодействие электрических токов и магнитных явлений, но их представления были крайне различны, если не сказать диаметрально противоположны. В то время как Ампер создавал представление о непосредственном действии токов друг на друга, Фарадей рассматривал преимущественно промежуточную среду и то силовое поле, существовавшее в этой промежуточной среде, через которое только и проявлялись действия токов.

Максвелл, синтезировав теории Ампера и Фарадея, сделал дальнейший шаг в сторону обобщения, включив в свою электромагнитную теорию и световые явления. В то время как электрические теории XVIII в. все внимание обращали на источник электрических явлений, на электрический заряд, возникающий на проводнике в результате трения двух тел, теория Фарадея—Максвелла рассматривала только те изменения, которые вызывают в окружающей среде заряды и токи. В самом начале нашего столетия эти противоположные точки зрения были синтезированы в электронной теории Лоренца, установившей, что и здесь речь идет о разных сторонах одного и того же реального явления.

На теории Фарадея—Максвелла построена вся современная электротехника сильных токов: наши генераторы, электромоторы, трансформаторы, а также и распространение радиоволн. Электронная теория положила начало изучению явлений разряда в газах, испускания электронов под действием света или высоких температур. Исследования в этой области явлений имели значение прежде всего для развития техники слабых токов.

Новая эпоха — эпоха квантовых представлений — началась с опубликования в 1913 г. знаменитой работы Нильса Бора о строении атома. Обобщив многочисленные указания, накопившиеся в самых разнообразных областях физики, он установил, что в атоме электрический заряд может обладать только рядом вполне определенных значений энергии и находиться только во вполне определенных состояниях. Электроны переходят из одного возможного состояния в другое, дискретное, резко отличное, но тоже возможное, минуя все промежуточные состояния, которые для них недоступны, «запрещены» законами квантовой физики.

Это странное на первый взгляд утверждение покоится на огромном и многообразном опытном материале. Пожалуй, наиболее наглядно квантовые свойства электронной оболочки атома сказываются в спектрах, испускаемых газами. Эти спектры состоят из тысяч отдельных линий. Ко времени появления работы Бора существовало около 60 тысяч измерений спектров различных газов. Все они были эмпирически связаны арифметическими закономерностями, смысла которых никто не мог понять. Теория Бора объ-

яснила физический смысл спектров и другие физические явления, механизм которых был от нас скрыт. Не только оптика, но и магнитные явления, механические свойства тел, химические связи, периодическая система элементов, точный смысл которой до работ Бора далеко еще не был ясен, — все это на протяжении нескольких лет получило объяснение.

В настоящее время физика перешла от изучения внешних закономерностей к раскрытию внутреннего механизма явлений. На эту новую, квантовую физику и опирается наше понимание электрических явлений и наше представление о полупроводниках. Изучение полупроводников, в свою очередь обогащая эти представления, превращает квантовую схему в реальную теорию электрофизики.

Существо новых, квантовых представлений можно показать на некоторых примерах. На рис. 1 (слева) нанесен ряд черточек. Эти черточки изображают энергию, которой может обладать электрон в атоме. Энергия отсчитывается в вертикальном направлении от нижнего края чертежа. Только указанные значения энергии возможны для электрона в изолированном атоме. Спрашивается: что же будет происходить в том случае, если мы имеем не изолированный атом, а тело, совокупность атомов? Этот вопрос имеет весьма существенное значение.

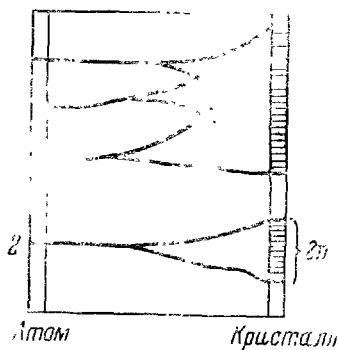


Рис. 1.

По мере сближения отдельных атомов, образующих в конце концов твердое тело, между ними начинает проявляться взаимодействие. Современная квантовая теория утверждает, что если мы имеем какое-то число  $N$  одинаковых взаимодействующих атомов, то тот уровень энергии, который был раньше у всех их одинаковым, начинает расщепляться на такое же число  $N$  близких друг к другу, но все-таки различных уровней.

Число атомов в любом достаточно заметном объеме твердого тела чрезвычайно велико (в кубическом сантиметре оно выражается двадцатидвухзначным числом). Следовательно, и каждый уровень энергии расщепляется на такое же громадное число отдельных, близких друг к другу уровней. Поэтому эти уровни можно считать как бы некоторой сплошной полосой и позабыть об их дискретности. На рис. 1 (справа) схематически изображено, что должно произойти с уровнями энергии электронов в атомах, когда последние конденсируются в твердое тело. Вместо системы отдельных уровней, свойственных атомам, в твердом теле имеются целые полосы уровней. Нижняя полоса уровней произошла от одной единственной энергии в атоме. Верхняя происходит

от трех отдельных уровней атомов. Между ними имеется «запрещенный» интервал, в котором электроны не могут находиться. Выше и ниже его густо расположена система возможных уровней.

Как ведут себя заряды в таком твердом теле? Каковы электрические свойства этого тела? Квантовая механика вносит здесь целый ряд новых, непривычных для нас представлений, каждое из которых, однако, точно подтверждено опытом, и притом весьма обширным. Пожалуй, важнейшее из этих представлений заключается в следующем: в твердом теле, как и в отдельном атоме, каждый из уровней может быть заполнен только одним электроном. Это так называемый принцип Паули, который впервые позволил объяснить многие стороны периодической системы элементов.

Для электропа принцип Паули вытекает из определенной формулировки квантовой теории. С такой же строгостью он должен быть применен и к твердому телу. Здесь много уровней, но на каждом из них может находиться только один электрон. Если этот уровень занят, то другой электрон там находиться не может. Когда речь идет об отдельном атоме, с таким утверждением можно свыкнуться, хотя и нелегко понять его. Но когда речь идет о большом теле, то его приходится рассматривать как одну систему. В этом случае еще труднее себе представить, как из-за того, что где-то данный уровень занят электроном, другой электрон не может его занять. Система уровней свойственна всему телу в целом, и мы не можем уже рассматривать отдельный электрон сам по себе. Поведение его зависит не только от него самого, но и от совокупности всех остальных электронов. Мы должны рассматривать весь коллектив электронов как одно целое.

Этот принцип впервые привел к пониманию того, почему одни тела — металлы — прекрасно проводят электричество, другие — изоляторы — совсем не проводят, а третьи проводят лишь частично, почему и называются полупроводниками. Чем объясняется столь резкое различие в электрических свойствах этих трех типов тел? Оказывается, причина лежит в различном распределении уровней энергии, доступных для электропа. В одних веществах (рис. 2, а) мы получаем систему уровней, непрерывно примыкающих один к другому без промежутка. Таков, например, металл, являющийся проводником электрического тока. В каждом атоме имеются электроны (в  $1 \text{ см}^3$  тела их содержится до  $10^{23}$ ), и число их в теле чрезвычайно велико.

Электроны занимают ряд «дозволенных» уровней. Более низким уровням соответствует меньшая энергия. Стремление всякой системы перейти в состояние с меньшей энергией вполне естественно (так же, как камень падает вниз, а не вверх). Поэтому электроны прежде всего занимают уровни, соответствующие меньшим энергиям. Наконец, последовательно, вплоть до какой-то границы, все уровни оказываются занятыми. В металле

к этим уровням непосредственно примыкает еще целая система уровней, свободных от электронов. Под действием электрического поля электроны должны двигаться в определенную сторону, создавая целый поток, который мы воспринимаем как электрический ток. При прохождении тока энергия электрона увеличивается. А так как изменяются и энергия и направление движения электрона, последний должен перейти на новый, более высокий уровень. Поскольку этот уровень свободен, ничто не мешает такому переходу.

Совершенно другое дело, если имеется запрещенная зона уровней (рис. 2, в) и если все нижние зоны уже заполнены

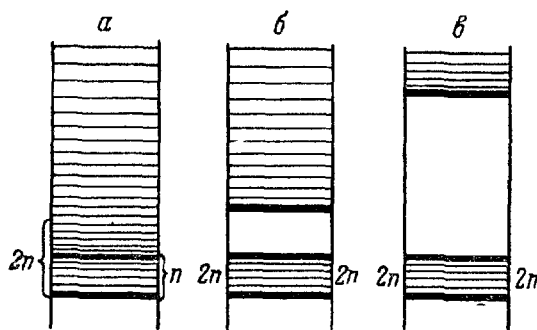


Рис. 2. а — металл, б — полупроводник, в — изолятор.

электронами. Допустим, что в нижних зонах имеется  $N$  уровней и  $N$  электронов, т. е. все уровни будут заняты. Имеются, правда, еще свободные уровни в верхних зонах, но их энергия уже значительно больше, по крайней мере на величину запрещенного промежутка. Электроны, находящиеся в таком теле в таком же числе, как в металле, совершенно бессильны изменить как-нибудь свое состояние, ибо все доступные для них уровни заняты. Единственное, что может произойти с электронами — обмен местами, но это никак не скажется на общем состоянии, потому что мы все равно отдельных электронов не различаем, а имеем дело, так сказать, с их коллективом.

Можно различать два случая: когда запрещенная зона сравнительно узка и когда она очень велика. Различие между ними заключается в следующем. Электроны, как было указано, занимают прежде всего наиболее низкие по энергии уровни, заполняя всю нижнюю зону. Но если бы они откуда-нибудь получили достаточную энергию для того, чтобы перескочить на более высокие уровни, то условия их движения изменились бы.

В обычных условиях всякое тело обладает той или иной тепловой энергией, тем более высокой, чем выше температура. Если

появится заметное число электронов, получивших энергию, достаточную для перехода в верхнюю зону свободных уровней, то в этой зоне, где уровней гораздо больше, чем электронов, они могут свободно переходить с одного уровня на другой, проводя электрический ток. Таков механизм полупроводника (рис. 2, б). При низких температурах такой полупроводник почти не проводит ток. С повышением же температуры его проводимость быстро растет. Если запрещенный промежуток настолько широк, что при доступных нам температурах электроны не получают энергию, необходимую для перехода в верхнюю зону, тело остается изолятором.

Таково наше представление о проводнике, полупроводнике и изоляторе. Различие между ними чисто количественное, но оно приводит к качественным изменениям. На рис. 2, а представлена модель проводника (металла), на рис. 2, в — изолятора, а на рис. 2, б — полупроводника, проводимость в котором тем лучше, чем выше температура, т. е. чем сильнее тепловое движение.

Наше современное представление об электроны в твердом теле во многих отношениях отличается от того, что мы думали о нем раньше. Раньше мы представляли себе электроны маленькими заряженными шариками, хаотически движущимися в проводнике, подобно молекулам, как это трактовала кинетическая теория газов. Этой аналогией электронная теория металлов и пользовалась для объяснения электрических свойств проводников. Сейчас мы уже не можем говорить об отдельных электронах главным образом потому, что законы их движения определяются волновой механикой. Мы должны рассматривать движение не отдельных электронов, а их совокупности, как распространение волн. Совершенно бессмысленно спрашивать, в какой точке находится волна. Волна не может быть локализована в точке, она размыта.

В соответствии с прежней электронной теорией представляли себе, что электроны, сталкиваясь с атомами тела, отталкиваются от них, как маленький шарик от большого, летят по другому направлению и т. д. Теперь будет правильнее сказать, что движение электронов больше напоминает распространение волн в среде, чем движение отдельных шариков. Волны, соответствующие электронам, рассеиваются так же, как свет рассеивается вокруг встречаемых им мелких объектов. Волновая механика обнаружила, что электрон — частица значительно более сложная, чем можно было предполагать вначале. Оказалось, что он не только имеет электрический заряд, но, представляя собой некоторый магнетик, обладает еще известным количеством вращательного движения. Законы его движения, естественно, не могут быть описаны простым перенесением опыта движения макроскопических шариков на эту систему.

В коротком обзоре нет возможности более конкретно и детально описать наши представления о движении электронов и электрических волн в твердом теле. Отметим лишь, что эти пред-



ставления привели нас к пониманию природы тех сил, которыми связаны частицы металла. Мы получили не только объяснение свойств чисто электрического характера, но и теорию химических, механических и тепловых явлений в металлах. Взаимодействие между атомами в металле совершенно не похоже на взаимодействие их в молекуле. Совокупность электронов, весь коллектив их связывается совокупностью атомов, и химические соединения среди металлических сплавов определяются не отношением химических валентностей, как в газах или изоляторах, а условиями минимальной энергии коллектива электронов. Поэтому и оказывается, например, что металлы могут образовывать определенные, резко выраженные соединения тогда, когда

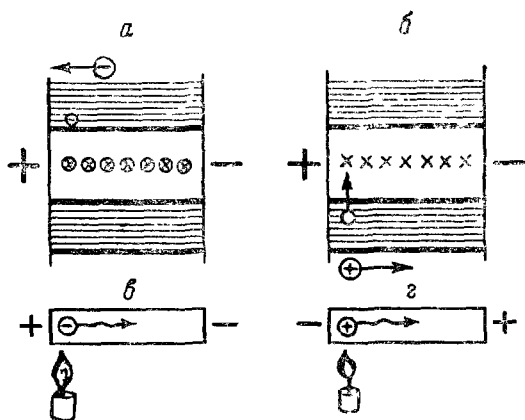


Рис. 3.

отношение числа электронов к числу атомов равно 21:13 или 57:21 — числа, которые в обычной химической теории валентности никакого смысла не имеют, но совершенно точно подтверждаются изучением сплавов. Добавим, что упругие постоянные, прочность металла и другие его свойства также определяются в основном поведением электронного коллектива, а не отдельных электронов, связанных с отдельными атомами.

Новые представления об электричестве в твердом теле, охарактеризованные нами в самых общих чертах, существенно отличны не только от представлений об электрической жидкости, но и от электронных теорий начала нашего века, которые рассматривали электрон как заряд, лишенный структуры. Как же проявляются эти свойства электричества в действительных явлениях?

Полупроводник, в соответствии с вышесказанным, представляет такую систему, в которой доступные для электрона уровни энергии разделяются на две группы (рис. 3). Одна группа этих

уровней сплошь заполнена электронами, и поэтому здесь никаких изменений произойти не может. Кроме того, на определенном расстоянии имеется еще другая система свободных уровней. Если небольшая часть электронов каким-нибудь внешними силами, например тепловым движением или светом, будет выброшена из нижней зоны в верхнюю, то произойдет некоторое изменение общего состояния. Движение электронов, находящихся в верхней зоне, следует примерно тем же законам, по которым происходит движение свободных электрических зарядов. Под действием электрического поля такой электрон движется от отрицательного полюса к положительному (рис. 3, а).

А что будет с электронами, оставшимися в нижней зоне? Если из нее ушло какое-то число электронов, тогда уже эта зона заполнена не сплошь; в ней остается некоторое количество свободных мест, «пустых» уровней. Теперь для оставшихся там электронов полного запрета изменять свое движение нет, появляется какая-то возможность их перемещения. Представляя себе, что где-то в пространстве электрон ушел и его место осталось свободным, мы говорим: вместо ушедшего электрона образовалась «дырка», «пустой уровень». Эта «дырка» может быть заполнена одним из ближайших соседних электронов, находившихся справа, слева, сверху или снизу.\* «Дырка» будет заполнена, но тогда освободится то место, которое только что занимал электрон, т. е. появится новая «дырка», скажем, слева. Это место снова будет заполнено электроном, находящимся слева, и т. д.

Если мы проследим за перемещением свободного места, то заметим, что оно движется навстречу входящим в данную зону электронам. Следовательно, если электрон движется в данном поле справа налево, то свободное место, заполняемое электронами, перемещается им навстречу, т. е. слева направо (рис. 3, б). Свободное место будет двигаться в данном электрическом поле так, как двигался бы положительный заряд. На самом деле мы не думаем, что двигаются положительные заряды; двигаются электроны, и двигаются всегда в одну и ту же сторону (рис. 3). Но в нижней зоне движение соответствует перемещению положительного заряда (мы часто говорим «положительной дырки»). В верхней же зоне процесс вполне соответствует движению свободного отрицательно заряженного электрона. Это различие является основным, и на нем именно построено разрешение многих практических задач в области полупроводников.

Разделение «дырок» и электронов звучит несколько схоластически; но вот на рис. 3, в изображен простейший прием, позволяющий реально обнаружить это различие. Положим, у нас име-

---

\* Если существует электрическое поле, которое гонит все электроны в направлении от отрицательного полюса к положительному, то естественно, что «дырка» чаще всего будет заполнена тем электроном, который приходит к ней под действием поля слева.

ется полупроводник. Нагреем один конец его. Тогда электроны начнут двигаться быстрее, и в верхнюю, свободную зону их перейдет больше. Стремясь распределиться более равномерно, часть электронов уйдет к холодному концу полупроводника. На горячем конце его останется избыточный положительный заряд, а холодный конец, куда перейдут электроны, зарядится отрицательно. Нагретое место зарядилось положительно — значит, отрицательные электроны свободно перемещаются. Если же ток переносится «дырками» (рис. 3, 2), то при нагревании появится большое число пустых мест. Они тоже начнут уходить, т. е. замещаться электронами. Нагретый конец окажется поэтому заряженным отрицательно, к нему придет гораздо больше отрицательных электронов, чем их было вначале, а холодный конец зарядится положительно. Итак, если движется отрицательный электрон, нагретый конец полупроводника заряжается положительно, а охлажденный — отрицательно. Если же движется «дырка», то нагретый конец заряжается отрицательно, а охлажденный — положительно. Вот элементарный опыт, сразу позволивший сказать, с каким из двух возможных механизмов тока мы имеем дело.

В этой связи небезынтересно вспомнить представления об электрических жидкостях. Как было сказано выше, на заре развития учения об электричестве существовали две гипотезы: одна утверждала наличие двух противоположных жидкостей, другая сводила все к недостатку или избытку одной жидкости. Любопытно, что та же самая идея, но в измененной форме имеет место и в современной квантовой теории. В сущности говоря, то, что называют «дырками», есть не что иное, как недостаток электронов по сравнению с числом уровней.

Кроме основных уровней, в состав кристалла могут входить еще и другие, добавочные уровни электронов. Этим обстоятельством мы также очень широко пользуемся.

Действительность сложнее изложенной здесь схемы. Полупроводники — это почти весь окружающий нас неорганический мир. Поэтому мы рассматриваем не какой-то специально подобранный класс веществ, а неорганическую природу в целом и ее электрические свойства. Химический состав этих веществ в твердом виде несколько отличается от привычных представлений о газовых молекулах.

Рассмотрим, например, твердую соль — хлористый натрий. Здесь число атомов хлора и атомов натрия равно друг другу так же, как в отдельной молекуле хлористого натрия, заключающей по одному атому хлора и натрия. Но это только приблизительно так. На самом деле благодаря существованию теплового движения все время, то в одном, то в другом месте атомы срываются со своих мест; часть их может выйти наружу и перейти в окружающую среду. В результате число атомов натрия не будет равно числу атомов хлора. В окислах кислород обменива-

ется с окружающей средой, создавая в одних случаях избыток, в других — недостаток кислорода по сравнению с химической формулой.

Полупроводники — и это является важнейшим их свойством — отличаются тем, что состав их никогда не отвечает строго химической стехиометрической формуле. Между тем отступления от нее являются решающими. Достаточно увеличить количество кислорода в закиси меди на 1%, чтобы электропроводность ее возросла в миллион раз и чтобы все ее свойства резко изменились. Таким образом, сравнительно небольшими химическими воздействиями мы можем вносить самые фундаментальные изменения в свойства полупроводников. В частности, мы можем из материала, который обладает электронной проводимостью, сделать материал, обладающий «дырочной» проводимостью.

Если мы так изменим материал, что появятся атомы, легко отдающие свои электроны, то получится электронный проводник. Если в то же вещество внести атомы, которые захватывают электроны, мы получим «дырочный» проводник. Такова теперь уже достаточно развитая картина многообразия полупроводников — оксидов, сульфидов, карбидов и т. д. Надо сказать, что это представление является еще только качественной картиной явления, и наша задача заключается в том, чтобы использовать ее для создания количественной теории, которая позволила бы точно предсказывать и указывать пути изменения тех или других свойств полупроводников.

Мы уже находимся на такой ступени знаний, которая позволяет утверждать, что эта задача в значительной степени нами разрешена. Изучая данный материал систематически и разносторонне, мы можем заранее количественно вычислить величину его термодвижущей силы, т. е. ту разность потенциалов, которая возникает, если создать определенную разность температур. Кроме того, в ряде случаев мы знаем, как превратить данное вещество в материал, обладающий заданными желательными для нас свойствами. Значит, мы научились, до некоторой степени, владеть свойствами полупроводников.

Полупроводники технически особенно интересны потому, что на границе их с металлом, в пограничном слое, наблюдаются явления, несвойственные ни металлам, ни изоляторам, явления, которые, собственно, и были основой их первых технических применений. На границе между металлом и полупроводником можно создать, например, такие условия, при которых ток проходил бы только в одном направлении и почти совсем не проходил в другом. На этом принципе построены так называемые выпрямители переменного тока.

В самом начале моей научной деятельности, примерно 35 лет тому назад, передо мной как загадка возник вопрос: почему могут существовать изоляторы, сквозь которые электрический ток не проходит? Если изолятор заключен между металлическими

электродами, в которых электронов сколько угодно, почему эти электроны не проходят через изолятор пассивно? Возможных ответов могло быть два: либо потому, что электроны не могут перейти из металла в диэлектрик, либо потому, что они не могут двигаться внутри диэлектрика. Какое из этих соображений действительно?

Для того чтобы решить этот вопрос, автор настоящей статьи пытался внести заряды во внутрь диэлектрика. Воздействуя ультрафиолетовым светом, рентгеновскими, радиевыми лучами и т. д. на различные изолирующие кристаллы (кварц, серу, каменную соль, сильвин и др.), удавалось создавать заряды, которые, оказывается, совершенно свободно перемещаются в этих кристаллах. Это дало основание предположить, что если некоторое количество зарядов попадает в зону, где уровни свободны, то ничто не мешает им перемещаться из одного места в другое и проводить ток.

Казалось, что главную трудность для электронов представляет переход из металла в изолятор. Сам по себе этот факт несколько не удивителен: из металла электрон не переходит в воздух, не переходит и в «пустоту», но хорошо известно, что ультрафиолетовый свет может переводить электроны из металла в пустоту. Почему же он не может перенести их и в диэлектрик? Переводя электрон в пустоту, мы отрываем его от всех связей в металле, здесь же, вырывая электрон из металла, мы вносим его в новую втягивающую среду. Следовательно, для переноса электрона в диэлектрик энергии должно требоваться значительно меньше, чем при вырывании его в пустоту. Для выяснения этого нами были проведены исследования, но они давали результат, противоположный ожидаемому. Оказывалось, что электрон легче вырвать в пустоту, нежели в изолятор, что для переноса электрона в пустоту ему надо сообщать энергии не меньше, а больше, чем при вырывании в диэлектрик.

Для того чтобы электрон перешел из металла в изолятор, мало сообщить ему энергию, достаточную для отрыва от металла. Нужно, чтобы он попал в свободную зону, поскольку только тогда мы заметим электрической ток. Электроны в металле обладают энергией, равной середине запрещенной зоны. Значит, половина ширины этой зоны представляет ту энергию, которую нужно сообщить электрону, чтобы перевести его в диэлектрик. Но и это оказалось неверным.

Более ясные представления о переходе электронов из металла в полупроводники можно получить из рассмотрения явлений на границе между двумя полупроводниками или полупроводником и металлом — явлений, лежащих в основе технических выпрямителей.

Выпрямитель, как удалось установить, состоит из металлической пластинки, к которой примыкает тонкий изолирующий слой. За ним следует полупроводник и снова металл. Такая система

обладает способностью пропускать ток в одном направлении и не пропускать его в противоположном. В существующих выпрямителях из закиси меди или селена электроны свободно идут из металла через изолирующий слой в полупроводник, но не идут из полупроводника в металл. Объяснение этому казалось простым: в металле много электронов, и поэтому они идут оттуда в большом количестве, а в полупроводнике их мало — значит, в противоположном направлении они почти не пойдут. Однако заманчиво простое объяснение оказалось неверным.

Совместно с Я. И. Френкелем мы разработали соответствующую теорию этого явления.\*

Так как реальные характеристики промежуточного слоя технического выпрямителя были совершенно неизвестны, то для опытов изготовлялась модель такого выпрямителя: заранее известный тонкий изолирующий слой наносился на полупроводник и покрывался слоем металла.\*\* При этом оказалось, что при

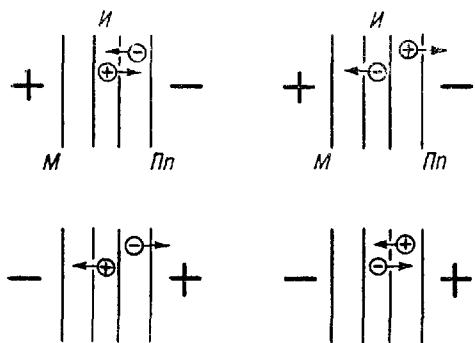


Рис. 4.

толщине изолирующего слоя в несколько десятых миллиметра сильный ток идет то в одном, то в другом направлении, в зависимости от вида полупроводника — электронного или «дырочного». В «дырочном» полупроводнике электроны идут из металла, в электронном, наоборот, — в металл.

Стало быть, дело не в том, что в металле электронов много, а в диэлектрике мало — все определяется механизмом проводимости. Представим себе систему (рис. 4) из металла, слоя изолятора и полупроводника. Если металл и изолирующий слой всегда одни и те же, а полупроводники разные, результаты не будут совпадать. Причину этого явления надо искать не на границе с металлом, а на границе между изолятором и полупроводником; надо выяснить, что происходит на границе между двумя полупроводниками.

В начале нами исследовании явлений, происходящих на границе двух различных полупроводников, мы расположили последние в определенный ряд так, чтобы каждый предыдущий (по

\* Другую теорию, построенную на том же принципе, разработал голландский физик ван Гель.

\*\* В нашей лаборатории эти опыты были поставлены В. П. Жузе и затем Хартманом в Германии.

отношению к последующему) пропускал положительный ток, а последующий (по отношению к своему предшественнику) — отрицательный ток. Для уяснения сути выводов, к которым мы пришли в результате исследований, нужно представить себе, что проводник электронный, т. е. отрицательные электроны движутся к металлу, а навстречу им из изолятора движутся положительные «дырки». Таким образом, два потока — электронов и «дырок» — идут навстречу друг другу. Электроны заполняют «дырки», и ток идет беспрепятственно. Но предположим, что направление тока изменилось: электроны уходят из металла, и на границе образуется слой, в котором свободных зарядов нет. Тогда получится непроводящий слой. Если же в полупроводнике «дырки» подвижны, то картина получается обратная. Эти рассуждения полностью согласуются с опытными данными.

После рассмотрения явлений на границе двух различных полупроводников мы исследовали явления, имеющие место на границе металла с полупроводником. На рис. 5 (слева) показан металл со свободными уровнями, а справа — полупроводник с уровнями, разделенными запрещенной зоной. Между ними изображен уровень свободного электрона. Возьмем для рассмотрения случай электронного полупроводника. Его электроны оказываются на более высоком уровне, чем в металле, и, естественно, при соприкосновении уходят в металл, заряжая его отрицательно. В полупроводнике образуется недостаток отрицательных зарядов, и он зарядится положительно.

Итак, в рассмотренном случае заряды из слоя полупроводника удалятся в металл. Вследствие этого образуется пограничный, лишенный свободных зарядов слой, не проводящий тока, а энергия электронов становится значительно большей. Для того чтобы электронам подняться из металла в свободную зону полупроводника, им нужно затратить большую работу, чем раньше. Если учесть это обстоятельство, то окажется, что для перехода электронов из металла в диэлектрик или полупроводник нужно затратить энергию, которая не будет равна, как мы раньше предполагали, половине ширины запрещенной зоны. Оказывается, количественно вполне возможно предсказать, при каких условиях, как и сколько электронов будет переходить из металла в полупроводник. Это даст нам точные сведения о том, почему изолятор

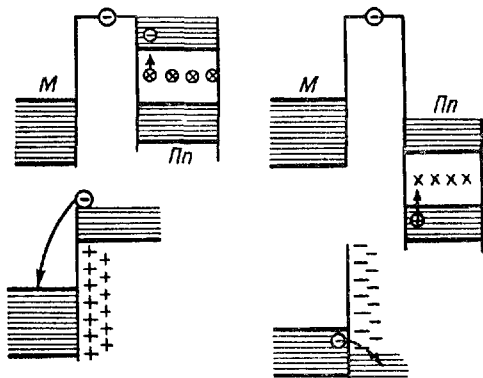


Рис. 5.

не проводит электрического тока и что нужно сделать, чтобы он начал его проводить.

Впервые люди получили представление об электричестве из явления электризации трением. Но до настоящего времени это явление оставалось непонятным. Было совершенно неясно, почему при трении (на самом деле речь идет о простом соприкосновении) одно тело заряжается положительно, другое — отрицательно. Для определения знака заряда имелись эмпирические правила, но о величине заряда мы не имели никакого представления.

Рассмотренная нами пограничная электризация представляет количественную теорию электризации трением. Исходя из расположения энергетических уровней, мы можем предсказать, переходит электрон в металл или из металла. Более того, мы можем определить, какое количество зарядов перейдет при этом в металл или в полупроводник. Наконец, вместо металлов мы можем взять любые два тела и произвести тот же расчет явлений на границе между ними. Таким образом, интересуясь явлениями, которые, казалось бы, не имеют ничего общего с электризацией трением, мы вплотную подошли к проблеме, давно ждущей своего разрешения. Можно надеяться, что на этом пути она будет разрешена.

Итак, теперь мы имеем основы проверенной опытом количественной теории полупроводников и знаем, какими приемами можно менять их электрические свойства. Естественно применить такую теорию к решению технических задач.

Первым техническим использованием полупроводников были выпрямители переменного тока. В 1927 г. американский инженер Грондаль обнаружил, что, окисляя медь при высоких температурах — порядка  $1000^{\circ}\text{C}$ , можно получить пластины, обладающие свойством легко пропускать ток одного направления и создавать весьма большие сопротивления для токов обратного направления. Если к такой пластине приложить разность потенциалов в несколько вольт так, чтобы металлическая медь являлась катодом, а паросшая на ней закись меди анодом, то создается ток, в тысячи раз больший того, который получается в той же цепи, когда медь служит анодом. В первом случае ток будет измеряться амперами, во втором — миллиамперами. Если приготовленную таким образом пластину включить в цепь переменного тока, то мы практически будем наблюдать ток одного направления. Следовательно, пластина Грондаля является выпрямителем переменного тока.\*

---

\* Аналогичное свойство полупроводников уже давно было известно радиолюбителям, применявшим кристаллические детекторы (кристаллики сернистых металлов) с острой иглой в качестве электрода; высокочастотные колебания, создаваемые радиоволнами, выпрямляются таким детектором.



Созданные Гропдалем выпрямители вызвали в США возникновение новой крупной отрасли производства. У нас в СССР до последнего времени производились маломощные выпрямители из закиси меди, рассчитанные на токи примерно в 3—5 а (применяются для автоблокировки транспорта), в то время как за границей имелись уже аналогичные устройства на десятки тысяч ампер. Совместно с одним из заводов Ленинградский физико-технический институт Академии наук СССР разработал технологию промышленного изготовления выпрямителей на сотни и тысячи ампер и установил технические условия их эксплуатации при низких и высоких температурах. По качеству эти выпрямители не уступают американским. В Германии примерно в 1933 г. появились селеновые выпрямители, свойства которых несколько отличны от свойств меднозакисных выпрямителей. Их производство мы тоже изучили, как говорится, освоили, и теперь можем производить селеновые выпрямители не хуже германских.

Но не только в этом заключается задача научного института. Он, конечно, должен помочь использовать на практике то новое, что сделалось известным науке, иначе мало стоили бы все его изыскания. Но он должен пойти и дальше. Поэтому на основе теоретических представлений о свойствах и механизме действия полупроводников, о которых идет речь в этой статье, сотрудники Ленинградского физико-технического института Б. В. Курчатов и Ю. А. Дунаев попробовали построить рациональный выпрямитель.

Конструкция разработанного ими выпрямителя представляет собой алюминиевую чашечку, в которую закладывается магний и полупроводник сернистой меди с некоторыми добавками. Затем накладывается крышка, отделенная тонкой слюдяной пластинкой. При прохождении электрического тока выпрямитель сваривается. Вот и вся технология его изготовления. Этот выпрямитель без всякого охлаждения дает ток до 30 а при 17 в, а при дутье — до 80 а.

Выпрямитель Б. В. Курчатова имеет большие достоинства; плотность рабочего тока, допускаемая им, в 100 раз больше плотности выпрямителя из закиси меди; вместо меди, которая на обычные выпрямители расходуется тоннами, здесь затрачивается совсем немного алюминия. Большое значение имеет также и простота изготовления выпрямителя, не требующего сложной термической обработки, сильно удорожающей производство меднозакисных и селеновых выпрямителей.

В табл. 1 сопоставлены свойства различных выпрямителей. Таким образом, по некоторым электротехническим показателям наши выпрямители представляют значительный шаг вперед. Правда, их еще нельзя соединять последовательно на более высокие напряжения, но сейчас, опираясь на развивающуюся теорию вопроса, мы продолжаем работу над их улучшением и повышением коэффициента полезного действия. Повышение кнд вы-

ТАБЛИЦА 1

Характеристика выпрямителей	Cu <sub>2</sub> O	Se	Cu <sub>2</sub> S	
	США, 1929 г.	Германия, 1933 г.	СССР, 1938 г.	США, 1939 г.
$I/S$ , а/см <sup>2</sup> без охлаждения	0.05	0.04	5	—
с охлаждением	0.15	0.14	10	5.5
V, в	8	15	17	5
Кпд, %	75	75	70	55

прямителей с 75 до 90—95% имеет очень важное значение. Если бы мы имели выпрямители с таким высоким кпд, соответствующим современным электротехническим приборам, тогда переход от переменного тока к постоянному был бы окончательно решенной задачей, мы могли бы сочетать легкую превратимость переменных токов с удобствами управления и регулировки, которые обеспечивают пользование постоянным током.

Сравнительно давно известным применением полупроводников являются также фотоэлементы. В 1930 г. Ланге в Германии обратил внимание на то, что меднозакисные выпрямители обладают и фотоэлектрическими свойствами, создавая при освещении электродвижущую силу и соответственный ток. Затем в 1931 г. Бергману удалось изготовить значительно лучшие фотоэлементы из селена. Селен давно известен как вещество, резко меняющее электрическое сопротивление при освещении. Система передачи изображений по проводам — система Корна — была основана именно на использовании этого свойства селена. В настоящее время наша практика знает почти только одни селеновые фотоэлементы, которые используются для фотографии, в измерительной технике и т. д.

Установив, что свойства твердых фотоэлементов определяются fotocувствительностью полупроводника, работники Ленинградского физико-технического института поставили себе следующую задачу: создать фотоэлементы из материала, обладающего гораздо более сильным внутренним фотоэффектом, чем закись меди или селен, а именно — из сернистого таллия. Было установлено, что и закись меди и селен обладают «дырочным» механизмом проводимости, который мы описали выше. Сернистый же таллий, как оказалось, в зависимости от избытка в нем серы или таллия может быть сделан как «дырочным», так и электронным полупроводником (табл. 2).

В «дырочном» полупроводнике свет, вырывая электрон, сообщает ему энергию, достаточную для перехода в свободное состояние. Пройдя через запирающий слой и металл, электрон заряжает последний своим отрицательным зарядом. В электронном же

ТАБЛИЦА 2

Характеристика выпрямителей	Германия, 1930 г.		СССР, 1937 г.
	Cu <sub>2</sub> O	Se	Tl <sub>2</sub> S
$I/L$ , а/дм · 10 <sup>-6</sup>	100	400	10000
$\lambda$ , ммк	400—600	300—700	400—1300
КПД, %	0.01	0.04	1.1

полупроводнике электрон, вырванный светом, освобождает одно из нормальных квантовых состояний, которое сейчас же занимает электрон, пришедший через запорный слой из металла. При этом металл, отдав электрон, заряжается положительно. Это новый, еще никогда не наблюдавшийся вид фотоэффекта запорного слоя. Научный сотрудник Ленинградского физико-технического института Б. Т. Коломиец создал фотоэлементы, построенные на этом принципе. Они отличаются весьма ценными в практическом отношении особенностями. В то время как «дырочные» фотоэлементы работают лишь в диапазоне видимого света, электронные обладают особенно высокой чувствительностью именно к невидимым, инфракрасным лучам. Получаемый при этом ток в несколько раз превосходит ток от фотоэлементов с «дырочным» механизмом (от 5000 до 10000 ма/дм).

Эти серногаллиевые фотоэлементы Б. Т. Коломиец применил для звукового кино. К XVIII съезду ВКП(б) на заводе «Ленкинап» была создана новая аппаратура. Она безупречно работает до сих пор в Доме кино и кинотеатрах Ленинграда. Новая аппаратура отличается простотой: нет необходимости в добавочном фотокаскаде усиления, в источниках и проводках высокого напряжения, но главное ее преимущество — чистота звука. Единственным источником тока в новых фотоэлементах и громкоговорителях служат свет, проходящий сквозь киноленту. Если этого освещения нет, звук полностью отсутствует. В прежних же аппаратах, где имелись высоковольтные батареи, ток проходил самым беспорядочным образом и давал те неприятные потрескивания и шипение, которые так портили звук в кино.

Другая область применения новых фотоэлементов — приборы, обеспечивающие безопасность горных и шахтных работ. Появляющиеся в воздухе небольшие частицы горючих газов сгорают на поверхности платиновой проволоочки, нагретой током, и повышают ее температуру, а фотоэлемент, воспринимая невидимые глазу инфракрасные лучи, отмечает этот нагрев и дает сигнал о приближении опасности. При помощи новых фотоэлементов можно осуществить разнообразную сигнализацию, автоматизацию многих технических процессов, сортировку и контроль изделий и многое другое.

Обращает на себя особое внимание величина их кпд. Твердые фотоэлементы являются прибором для преобразования световой энергии в электрическую. Такой фотоэлемент сам генерирует и электродвижущую силу и ток и, таким образом, создает некоторую электрическую энергию. Величина кпд показывает, какая часть падающего света превращается в электрическую энергию. В селеновых фотоэлементах эта величина составляет 0.04%, а в новых — около 1%. Конечно, 1% — это очень немного, но все-таки если вспомнить, что здесь начало решения одной из задач, представляющих собою мечту энергетики, а именно: прямое превращение солнечного света в электрическую энергию, то эта величина все же представляет известный интерес. Достижение 1% означает шаг вперед в разрешении этой задачи. Лет 10 тому назад, пытаясь представить себе задачи социалистической техники, я указывал на перспективу превращения солнечной энергии в электрическую. Тогда я намечал возможность более значительного увеличения кпд твердых фотоэлементов; теперь в известной мере это осуществляется.

Третий вид использования полупроводников, который в отличие от двух первых находится еще в стадии развития, — это термоэлементы — приборы, превращающие тепловую энергию в электрическую. В силу неизбежных процессов теплопроводности по тем проводам, которые несут ток, кпд термоэлементов гораздо меньше, чем у тепловых машин. Термоэлементы из металлов дают всегда меньше 1% электроэнергии по отношению к затраченной теплоте.

Лет 10 тому назад мое утверждение о том, что кпд термоэлемента при помощи полупроводников можно повысить с 1—2 до 4%, встретило резкую критику. Сейчас, создавая в пластинке из сернистого свинца размером в 3 см разность температур порядка нескольких сот градусов, мы получаем ток до 50 а при напряжении 0.1 в. Кпд невелик, но и работа еще далеко не завершена. Она, однако, подтверждает, что термоэлектрические явления в полупроводниках могут служить источниками мощных токов. Даже при кпд в 10% термоэлементы не смогут еще конкурировать с машинами, но благодаря крайней простоте, отсутствию движущихся частей и компактности для определенных целей они могут иметь значение не только как измерители температуры и лучшей энергии, но и как источники тока.

За последние годы использование полупроводников в технике растет с необычайной быстротой. Обладая уже некоторым опытом и знаниями в этой области электрофизики, мы можем и должны добиться от применения полупроводников в технике и научных исследованиях результатов, гораздо больших и лучших, чем те, которые описаны в этой статье.

Статья опубликована в журнале «Советская наука», № 11, с. 90—104, 1940 и представляет собой стенограмму доклада, прочитанного А. Ф. Иоффе на общем собрании Академии наук СССР 29 октября 1940 г. в день его 60-летия (см. также: Вестник АН СССР, № 10, с. 12—27, 1940).

## ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Нет надобности ломиться в открытую дверь и разъяснять значение проблемы полупроводников. Оно достаточно известно. Но этой проблеме свойственно определенное своеобразие, из чего следуют, как мне кажется, серьезные выводы.

Прежде всего, проблему полупроводников нельзя считать только физической — она в одинаковой степени охватывает и химию, и кристаллографию, и технику. Исследования в области полупроводников имеют выходы в радиотехнику, электротехнику, автоматику, приборостроение, энергетику, холодильную технику и т. д.

В современной физике проблема полупроводников занимает основное, решающее место в теории твердого тела и конденсированных систем. Однако теоретические основы этой проблемы часто не соответствуют громадному опытному материалу. Отмечу только две трудности, наличие которых не может вызывать сомнения.

Первая — вопрос о характере движения электронов в полупроводнике. Согласно современной теории, в полупроводнике имеется некоторое количество электронов, которые находятся в особом свободном состоянии и движутся подобно молекулам газа, свободно проходя определенные пути. Встречая те или иные серьезные нарушения правильности кристалла, они рассеиваются, после чего движутся в другом направлении, снова встречаются какой-то дефект кристалла и вновь рассеиваются.

Исходя из этой картины построена современная теория полупроводников. Но если подсчитать длину пути, который проходят электроны, то часто оказывается, что аналогия с газом не имеет смысла. Среди громадного многообразия полупроводников — от металлов с электропроводностью в  $10^5$  до изоляторов с электропроводностью  $10^{-10}$  — немало таких, для которых пути свободного движения электронов (от одного столкновения до другого) меньше, чем межатомные расстояния, чем длина волны электронов. Хорошо известно, что о путях движения электронов на протяжении, меньшем длины их волны, нельзя и говорить, так как понятия скорости и направления движения не имеют в данном случае смысла. Поскольку основное понятие средней скорости движения электронов также лишается реального содержания, то и вся теория, определяющая эти скорости, не может найти применения.

Другая сторона вопроса заключается в том, что существующая теория, которая на протяжении 30-летней истории полупроводников дала много полезных и важных результатов и хорошо описала ряд явлений, построена только на одном свойстве кристаллов — периодичности их структуры — и не учитывает свойства периодически повторяющейся элементарной ячейки кристалла.

Таким образом, теория рассматривает только какое-то периодическое поле, и это оказывается уже достаточным для получения ряда результатов, хорошо совпадающих с опытом. Но ясно, что индивидуальные свойства конкретного полупроводника определяются именно тем физическим строением ячейки, которая периодически повторяется.

Чтобы описать полупроводник и предсказать его свойства, важно знать, как построена ячейка, какие силы связывают образующие ее атомы в кристаллическую решетку. Суть заключается в свойствах химических связей, а не в том, что эти связи многократно повторяются. Опыты А. Р. Регеля показали, что, потеряв периодичность дальнего порядка при плавлении, полупроводник сохраняет все свои свойства. Значит, не в периодичности было дело! Оказалось, что свойства полупроводника целиком зависят не от дальнего, а от ближнего порядка, т. е. от расположения ближайших соседних атомов.

Полупроводник можно определить как пространственный полимер с насыщенными химическими связями. Если связи насыщенны — это металл. Поэтому существенное свойство полупроводника — химические связи в каждой отдельной ячейке. Различие между молекулой и ячейкой полупроводника сводится к их ограничению. В случае отдельной молекулы должно быть соблюдено требование, чтобы поле, создаваемое этой молекулой, в бесконечности обращалось в нуль. В кристаллическом или некристаллическом проводнике это должно соблюдаться по отношению к границе каждой ячейки. Поскольку справа и слева от нее условия симметричны, на самой границе силы равны нулю. Разница, таким образом, только в иных краевых условиях, существо же одинаково.

Мне представляется поэтому, что теория полупроводников — это химическая физика твердого тела. Основное свойство полупроводников, определяющее их поведение и их применения в тех или иных условиях, — это проблема химических связей, или, если говорить языком физики, проблема плотности распределения электрического заряда в пределах каждой данной ячейки.

Итак, для дальнейшего развития теории полупроводников решающим является ее поворот в сторону химии. Если химики преодолели свою недооценку квантовых представлений, которая мне кажется явным недоразумением, то проблема полупроводников станет новым звеном, связывающим физику и химию, наряду с физической химией и химической физикой, оформившимися раньше. Не стану касаться других, кстати сказать, немногочисленных, противоречий современной теории полупроводников, но и из сказанного уже можно увидеть, насколько необходимо уделять внимание основам этой теории. При этом следует добиваться такого ее развития, чтобы она давала не только качественную оценку, но и позволяла количественно определять свойства того или иного полупроводника исходя из химических связей, из рас-

предела электрического заряда в пределах отдельной кристаллографической ячейки. Теория должна также охватить всю область полупроводников — как кристаллических, так и аморфных.

Второе своеобразие проблемы полупроводников, которое она, впрочем, разделяет и с некоторыми другими, в особенности с проблемой атомного ядра, — тесная связь теории и эксперимента. Бессмысленно ставить опыты, не освещенные теорией, не связанные с техническими применениями, — можно потонуть в безграничном многообразии материалов. Полупроводников такое количество и такое разнообразие, что если не иметь в виду решения какой-либо определенной проблемы или получения определенных технических применений, можно провести тысячи работ, которые мало кому будут нужны.

Под техническими применениями нельзя понимать только то, что уже используется в технике. В области полупроводников, где с каждым месяцем появляются все новые и новые технические применения, основное направление исследования — изыскание путей лучшего решения задач техники. Чтобы не быть голословным, приведу один пример.

Центральное место в проблеме полупроводников занимает изучение так называемых *pn* переходов, т. е. границы, где свободные заряды имеют отрицательный и положительный знак. Это — отрицательные электроны и положительные дырки. На границе происходит ряд своеобразных, технически важных явлений. Если направление тока таково, что дырки и электроны идут навстречу друг другу, они рекомбинируют и дают сильный ток. При противоположном направлении они расходятся, и ток становится слабым. Это приводит к выпрямлению переменного тока, к резкой зависимости силы тока от направления.

Описанное явление было у нас известно еще до войны. Если сложить дырочный полупроводник с электронным, то при одном направлении тока получается большая электропроводимость, при другом — малая. Однако к практическим результатам такой опыт не привел, поскольку контакт двух соприкасающихся тел уже сам по себе создает большое сопротивление. Громадный успех был достигнут, когда границу удалось перенести внутрь монокристалла, одна часть которого обладала электронной, другая — дырочной проводимостью. В результате контактное сопротивление исчезло. Но этот успех повлек за собой новые трудности, с которыми мы пока полностью не справились.

Для создания внутри одного и того же кристалла дырочной и электронной частей сам кристалл должен быть необычайно чистым, с настолько малым количеством примесей, чтобы ничтожная добавка одного типа примесей делала его электронным, а ничтожная добавка других — дырочным. Сравнительно недавно это удалось сделать с германием. Здесь большая заслуга принадлежит академическим институтам, которые быстро нашли пути создания чистого германия. Однако пока мы еще не смогли так же хорошо

решить задачу в отношении другого перспективного элемента — кремния; работа в этом направлении продолжается.

Возникает вопрос: нельзя ли вернуться к первоначальному решению — создать границу не внутри проводника, что вызывает такие большие трудности, а между двумя полупроводниками, но устранить те отрицательные стороны контактного сопротивления, поглощения, рассеяния зарядов по границе, которые не были преодолены?

Следовательно, физическое исследование, направленное на решение задачи выпрямления тока, должно идти не только по линии изготовления чистого кремния, но и по линии разработки таких новых методов, при которых можно было бы использовать границу двух разных полупроводников, предварительно тщательно изучив их поверхностные свойства на основе квантовой теории. Иными словами, должна быть обеспечена теснейшая связь квантовой теории твердого тела, эксперимента и технических выходов. Вряд ли где-нибудь, кроме ядерной физики, эти три стороны задачи так тесно связаны между собой, как в проблеме полупроводников. Отсутствие одной из них делает малоперспективной всю работу.

Проблему полупроводников и проблему ядерной энергии в известной степени роднит также необходимость использования мощных технических средств. Достаточно сказать, что степень химической чистоты веществ при работе с полупроводниками совершенно иного масштаба, чем во всех других областях химии. Если обыкновенно сотые, тысячные доли процента являются пределом требуемой очистки, то здесь нужна чистота порядка  $10^{-6}$ — $10^{-9}$ , которая раньше никогда не достигалась. Это предъявляет серьезные требования к аналитической химии и металлургии, потому что такие вещества должны производиться отнюдь не в микроскопических количествах — они должны служить основой большой техники. Затем если пытаться решить задачу полупроводников с точки зрения химических связей, то выясняется, что она требует большого математического аппарата и, вероятно, не разрешима без электронно-счетных машин. Путь-то ясен: от зарядов можно перейти к электрическим полям, а затем к силам и энергетическим уровням, но количество вычислительной работы неизмеримо велико.

Кроме этих двух обстоятельств — необходимости невиданной до сих пор химической чистоты и сложности расчетов, для которых нужна иная техника вычислений, следует отметить еще температурный фактор. Громадное влияние температуры на полупроводники обуславливает их технические применения, поэтому требуется проведение исследований при весьма низких температурах (когда тепловое движение не затемняет основных квантовых свойств) и при весьма высоких температурах. Хорошая криогенная лаборатория, высокотемпературные печи совершенно необходимы для исследования полупроводников. Точно так же необходима механическая лаборатория, потому что проследить



виды связей, существующие в полупроводниках, можно лучше всего при изучении их механических свойств.

Несколько отвлекаясь от вопросов постановки исследований в области полупроводников, коротко остановлюсь на том направлении, которым занимаюсь уже много лет. Это — энергетические применения полупроводников при помощи термоэлементов. За последние годы нам удалось до известной степени повысить качество термоэлементов; сначала мы создали их теорию, а потом, пытаюсь осуществлять предсказания этой теории, получили полупроводниковые термоэлементы. В настоящее время они лучше зарубежных. При помощи таких, хотя далеко еще не совершенных, но уже достаточных для некоторых целей полупроводниковых термоэлементов, можно решать многие задачи. Например, изготавливаются источники энергии для радиоприемников и для радиостанций, разработана батарея для использования выхлопных газов трактора взамен динамо-машины и др.

Еще более многочисленны применения термоэлементов для охлаждения. Сейчас максимальное охлаждение, которое может дать один наш термоэлемент, составляет около  $-70^{\circ}\text{C}$ . Для сравнения отмечу, что, по имеющимся сведениям, термоэлементы в Америке и в Англии дают до  $-40^{\circ}$ , а во Франции до  $-35^{\circ}\text{C}$ .

На основе наших термоэлементов можно изготавливать бытовые холодильники, которые будут достаточно выгодными для самолетов ТУ-104, где они уже испытаны. Такого же типа холодильники разрабатываются для железнодорожного транспорта. Можно указать на применение термоэлементов в медицинской, биологической практике. Для получения срезов на микротоме надо иметь вполне определенную температуру: слишком высокая температура делает препарат пластичным — он не режется, а при низкой температуре — крошится. Оказалось возможным при помощи нескольких термоэлементов поддерживать препарат на той температуре, которая является оптимальной для получения срезов. Сейчас промышленностью изготавливается 2500 таких микротомов. Удалось осуществить автоматический ноль температуры. Термоэлемент позволяет держать определенный участок воды всегда на границе жидкой и твердой фаз. Как только вода тает, термоэлемент ее замораживает; когда она замерзает, термоэлемент ее подогревает; благодаря этому температура поддерживается точно на нуле.

Не стану перечислять всех возможных применений. В альбоме Института полупроводников имеется около 15 осуществленных решений в самых различных областях, в том числе термостатирование радиоаппаратуры, позволяющее вместо кремния, выдерживающего высокую температуру, пользоваться германием, поместив его в сосуд, в котором поддерживается температура  $30^{\circ}\text{C}$  с точностью  $0.1^{\circ}$  при внешней температуре от  $-50$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ . Можно разработать еще десятки других изделий. Приведу несколько неожиданный на первый взгляд пример. Казалось бы,

что общего с проблемой полупроводников имеет задача выведения породистого скота? А между тем она решается при помощи простого приема: изготавливаются термостаты, в которые помещается сперма производителей — быков; ее развозят по совхозам и колхозам, а температура ее поддерживается на таком уровне, что она сохраняет свою активность в течение длительного времени.

Исследования по проблеме полупроводников предъявляют своеобразные требования к кадрам научных работников. Прежде всего они должны владеть квантовой механикой, ибо в противном случае вряд ли можно рассчитывать на успешную работу в области полупроводников. Далее, эта работа требует знания химии. Умение разбираться в вопросах тонкой металлургии и технологии также чрезвычайно важно. Соотношение между работниками различной специализации, которые составляли бы действительно полный коллектив, способный взяться за проблему полупроводников, должно быть примерно такое: из 100 человек — 20 теоретиков, 40 экспериментаторов, 20 химиков и 20 инженеров. Конечно, эти цифры нельзя рассматривать как что-то определенное, но во всяком случае все четыре стороны должны совмещаться и взаимно оплодотворять друг друга. Можно рассчитывать, что в результате совместной работы в такого рода коллективе вырастут исследователи, способные охватить всю проблему в целом.

Для успеха работы в области полупроводников необходима литература. Мы начинаем издавать довольно большую серию популярной литературы по каждому из технических направлений, а по физике и основным вопросам теории — серию монографий. Можно надеяться, что дело идет по правильному пути.

Организация научной работы в масштабе не только Академии наук СССР, но и республиканских академий, особенно Академии наук УССР, где находится сильный центр исследования полупроводников, осуществляется специальной Комиссией по полупроводникам при Президиуме Академии наук СССР. Вся проблема разбита на 15 отдельных разделов, по каждому разделу указан ведущий институт, ответственный за его разработку, и перечислены институты, которые участвуют в исследованиях. Среди ведущих — Институт полупроводников, Физический институт им. П. И. Лебедева, Институт радиотехники и электроники, Институт физики металлов Уральского филиала Академии наук СССР, Институт физики в Киеве. Комиссия наметила и проводит узкие конференции по каждому разделу.

Вопросы организации исследований в области полупроводников обсуждались не так давно пленумом Комиссии и бюро Отделения физико-математических наук. И Комиссией, и Отделением предложен ряд мер для ликвидации имеющихся сейчас недостатков в работе по полупроводникам.

Настоятельно необходимо прежде всего обеспечить углубление и развитие теории полупроводников как центрального участка теории твердого тела, расширение экспериментальных исследований, улучшение существующих и разработку новых применений полупроводников, особенно в радиотехнике и электронике, автоматике и приборостроении, энергетике и холодильной технике. В течение шестой пятилетки нужно организовать ряд новых институтов с полупроводниковой тематикой, оборудовать эти и существующие институты и лаборатории современными приборами и установками, расширить тематику исследований, наладить теснейшую связь академических институтов с отраслевыми путем организации объединенных бригад, консультаций и передачи опыта, создать опытные заводы, конструкторские бюро и заводские лаборатории для разработки совместно с академическими институтами технологии и конструкции полупроводниковых устройств и изготовления первых их серий.

Большое значение имело бы командирование наших физиков, главным образом теоретиков, за границу для слушания курсов, которые будут читать крупнейшие ученые Америки, Англии, Франции и Италии. Командированные за рубеж молодые ученые смогут ознакомиться не только с тем, что делается в той или иной лаборатории, но и с основными идеями наших коллег в других странах.

Статья опубликована в журнале «Вестник Академии наук СССР», № 8, 15—20, 1957.

## МЕЧТА? НЕТ — БЛИЗКАЯ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТЬ

В решениях XXI съезда КПСС полупроводники наряду с другими областями передовой техники характеризуются как одно из ведущих средств технического прогресса в семилетнем плане. И это совершенно правильно. Нас, работников этого фронта науки и техники, решения съезда вдохновляют на достижение новых успехов, которые послужат нашим вкладом в выполнение величественных задач развернутого строительства коммунизма.

Полупроводники — одна из самых молодых отраслей науки и техники. Наиболее известны полупроводниковые приборы радиотехники. Полвека назад появились вакуумные лампы, которые внесли перелом в радиотехнику и обусловили ее бурное развитие. Теперь аналогичную роль играют полупроводники. Новые миниатюрные приборы в десятки раз меньше по своим размерам, чем радиолампы. Они потребляют во много раз меньше электроэнергии, не требуют предварительного накала и мгновенно вступают в действие, не боятся ударов и сотрясений. Все эти преимущества и ряд других открывают новые возможности перед радиотехникой и электроникой. Решительно облегчается построение электронно-счетных машин, которым предстоит громадное будущее.

Такие же приборы превращают энергию солнечных лучей в электрическую. Уже более девяти месяцев полупроводниковые фотоэлементы снабжают энергией наш третий искусственный спутник Земли. Полупроводниковые выпрямители превращают переменный ток в постоянный почти без потерь энергии и открывают реальные возможности для электрификации транспорта, для передачи энергии на большие расстояния. Полупроводниковые приборы используются в измерительной технике, автоматике, сигнализации, технике безопасности.

Уже только одних этих областей практического применения полупроводников было бы достаточно, чтобы обеспечить мощный рост их производства. И действительно, даже в США, где средний годовой прирост продукции составляет 2—3%, производство полупроводников выросло за прошлый год на 80%, а у нас и того больше.

Но в нашей стране найдены и другие сферы применения полупроводников, которые должны получить большое значение. Это малая энергетика и холодильное дело, различные бытовые приспособления. Все эти задачи могут решаться полупроводниковыми термоэлементами.

Уже более 100 лет назад было установлено, что в замкнутой цепи из двух разных проводников появляется электрический ток, если вдоль них идет поток тепла, т. е. когда одни концы их теплее других. Термоэлементы превращают тепловую энергию в электрическую без машин, без сложных конструкций. А если через термоэлемент пропустить ток, то одни концы проводов нагреваются, а другие охлаждаются. Значит, можно получить тепло и холод простым пропусканием электрического тока.

И прямое получение электроэнергии и прямое получение тепла и холода — заманчивые технические задачи — мечта инженерной мысли. Почему же электричество мы все еще получаем только с помощью паровых котлов, турбин и динамо-машин, а для охлаждения применяем сложные компрессорные устройства? Дело в том, что пока электротехника ограничивалась для этих целей одними металлами, из затраченной теплоты получалось едва 0.1—0.2% электроэнергии, а при наибольших затратах электроэнергии достигалось охлаждение не более, чем на 6°.

Полупроводники снимают эти ограничения, так как создаваемые ими термоэлектродвижущие силы в сотни раз больше, чем в металлах. Наши полупроводниковые термоэлементы могут теперь использовать уже до 8—9% тепла и охлаждать на 60—80°.

В настоящее время и термоэлементы, и фотоэлементы обладают коэффициентами полезного действия, близкими к 10%.

Это еще очень немного по сравнению с тепловыми двигателями. Но не надо забывать, что последние имеют за собою 150-летнюю историю развития, тогда как за полупроводниками всего два-три десятилетия. Не заглядывая далеко вперед, можно

уже сейчас видеть, какие огромные возможности несут с собой термоэлементы даже при ныне достигнутых показателях их работы, но при условии, что будет организовано их массовое производство. Дело в том, что не всегда решающим оказывается коэффициент полезного действия. Иногда преобладающее значение имеет простота устройства и легкость обслуживания. В этом случае полупроводники получают уже решающее преимущество. Приведу несколько примеров, хорошо проверенных практикой.

Тепла, получаемого от стекла керосиновой лампы, достаточно для того, чтобы помещенная над ним термобатарея питала радиоприемник. Электроэнергия получается попутно, без дополнительных затрат. Десятки тысяч таких ламп изготовлены нашей промышленностью, и с их помощью радиопередачи принимаются в самых отдаленных районах страны. Наши приборы получают теперь широкое распространение в арабских странах, в Индии и Индонезии, в Аргентине. Китайская Народная Республика сама производит такие приборы.

Изготовлены подогреваемые керогазом термобатареи, которые могут питать электроэнергией радиостанцию «Урожай». Сделаны печи с термобатареями, дающими до 1 квт электроэнергии для освещения. Если бы нам удалось, например, покрыть термоэлементами трубы котлов центрального отопления, то жильцы домов получили бы практически бесплатно немало электроэнергии для своих бытовых нужд и освещения.

Заманчивой мечтой всегда было получение электроэнергии непосредственно от Солнца, которое до появления атомных электростанций было единственным источником создания всех видов энергии на Земле — угля, нефти, торфа и дров, энергии рек и ветра. Элементарные подсчеты показывают, что с помощью термоэлементов мы могли бы получить электричество от Солнца при затратах меньших, чем требуют гидравлические электростанции.

Приводя в действие электронасосы, которые бы выкачивали воду из колодцев и орошали пустынные пески, полупроводниковые генераторы могут изменить всю экономику ныне безводных районов, создать условия для развития в них животноводства.

Великий французский физик Жюлио-Кюри незадолго до своей смерти писал мне, что он, как и я, убежден, что важнейшее средство решения энергетической проблемы — широкое применение термоэлектрических батарей. Совсем недавно крупный американский ученый Скэнлон сделал доклад в Академии наук в Вашингтоне о близких больших перспективах полупроводников со ссылкой на успехи, достигнутые в Советском Союзе по термоэлементам.

Другая область применения термоэлементов — создание тепла и холода. Мы давно знаем, как согреть различные предметы электрическим током. Но термоэлементы, сверх того, получают

еще часть тепла, отнимая его у окружающих более холодных источников, например у водопроводной воды. В результате для получения определенного количества тепла с помощью термоэлементов требуется электроэнергия в 2—3 раза меньше, чем при нагреве электрическими плитками.

Для охлаждения у нас по сей день используются весьма сложные установки. Термоэлементы же позволяют создавать дешевые и простые домашние холодильники, установки для охлаждения летом воздуха в железнодорожных вагонах, в автомобилях. С помощью термоэлементов можно поддерживать зимой и летом постоянную температуру в помещениях.

Термоэлементы помогают решать такие задачи, как определение влажности воздуха при полетах на больших высотах, изучение опухолей, охлаждение крови при операциях, более эффективное наблюдение под микроскопом биологических объектов. Наконец, обширное и разнообразное применение могли бы найти полупроводниковые приборы в сельском хозяйстве.

В предстоящем семилетии к большой энергетике тепловых, гидравлических и атомных электростанций прибавится малая энергетика — электричество будут получать без машин, что приведет к электрификации быта. Необходимо построить также первые солнечные электростанции.

Широкое распространение получат простые приемы управления температурой — подогрев, охлаждение, а также поддержание постоянной температуры подобно тому, как автоматически регулируется температура нашего тела.

Техника обогатится широким ассортиментом новых минеральных материалов, сверхчистыми полупроводниками и металлами. Их механические свойства еще слабо изучены, по исследовательскую работу в этом направлении надо интенсивно продолжать.

Многочисленные проблемы радиотехники будут разрешаться с ничтожными затратами электроэнергии, миниатюрными по своим размерам приборами, изготавливаемыми в большом количестве образцов. Для измерения и изучения различных явлений в производстве, в сельском хозяйстве, в нашем окружении мы получим, кроме радиоактивных изотопов, чрезвычайно чувствительные полупроводниковые приборы.

Эти приборы будут предупреждать о возможных нарушениях и авариях, сигнализировать о любых изменениях в производственных процессах, автоматически регулировать любые процессы. Электротехника получит в свое распоряжение гибкие средства управления токами и их превращения.

Каков же уровень решения этих задач у нас сейчас, в начале семилетки? К сожалению, термоэлектрические приборы у нас только начинают переходить в производство, так же как и выпрямители переменного тока. Радиотехнические приборы производятся, но не удовлетворяют растущему спросу ни по количеству, ни по качеству, ни по стоимости. Измерительные приборы

изготавливаются далеко не в достаточном количестве, особенно для сельского хозяйства.

Прежде всего необходимо увеличить масштабы исследовательской работы в области радиоэлектроники. Поиски новых творческих научных и инженерных решений предполагают непременно подъем уровня теоретической работы. Академия наук СССР и республиканские академии призваны объединить усилия ученых, инженеров и изобретателей, работающих по проблемам полупроводников, и обеспечить их искания прочной современной материальной базой.

Думается, что настало время для организации института полупроводниковой радиоэлектроники.

Организация массового изготовления термоэлементов выдвигает требования быстрого увеличения (в несколько раз) производства дефицитных в прошлом материалов — теллура, селена, висмута, сурьмы. Надо изыскать новые полупроводниковые материалы для изготовления более совершенных термоэлементов. Для того чтобы промышленности облегчить освоение производства приборов, разрабатываемых научно-исследовательскими институтами, при институтах необходимо организовать специальные конструкторские бюро как переходную ступень к промышленному производству.

Полупроводники, применяемые в радиоэлектронике для выпрямления переменных токов, в фотоэлементах, ставят особые, еще небывалые в технике требования химической чистоты материалов и препаратов. Если очистка материалов до сотых долей процента считалась раньше пределом, то теперь речь идет о миллионных долях, а иногда и миллиардных долях процента.

Советские ученые и инженеры-химики знают, как осуществлять эти требования, но для этого необходимы соответствующие условия производства — абсолютная чистота заводских помещений, строгая регулировка температур и т. п., не говоря уже об особом техническом оснащении. В полупроводниковых лабораториях и на заводах, изготавливающих, например, приборы из кремния, не допускается присутствие других материалов и металлов. Даже в воздухе этих помещений не должно быть следов никаких иных посторонних элементов, кроме кремния.

Следовательно, полупроводниковые лаборатории и заводы должны быть не только обеспечены соответствующими производственными площадями и хорошо оборудованы, но в них необходима как неременное условие высокая производственная культура.

Полупроводники — дело чрезвычайно тонкое. Зато эта область науки и техники открывает новые пути в радиотехнике и энергетике, несет с собой небывалые возможности облегчить и украсить быт советского человека.

Развитие науки и техники полупроводников — важнейшее государственное дело, выдвигаемое семилетним планом. Советские

ученые и инженеры приложат все свои силы, чтобы наша страна заняла достойное место в мирном соревновании с капитализмом и в этой многообещающей области человеческой деятельности.

Статья А. Ф. Иоффе опубликована в газете «Правда» от 1 марта 1959 г.

## НОВЫЕ ПУТИ ИЗУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В прошлом году отмечалось десятилетие изобретения транзисторов, которые наложили свою печать на все учение о полупроводниках. Изучение действительно чистого германия, его аналогов и *pn* переходов открыло широкую перспективу для исследований и впервые привело к количественному согласию эксперимента с теорией. Но было бы преувеличением считать, что мы овладели физикой всех полупроводников с удельными сопротивлениями от  $10^{-4}$  до  $10^{10}$  ом·см, подвижностями от  $10^{-2}$  до  $10^6$  см<sup>2</sup>/в·сек., при температурах вплоть до  $4000^\circ$  и давлении до  $10^6$  атм. Мы еще далеки от всестороннего познания свойств даже твердых, а тем более жидких и газообразных полупроводников.

Области использования полупроводников непрерывно расширяются; наступающее десятилетие выдвигает, видимо, задачи энергетического характера с применением новых материалов и изучением их новых свойств.

В качестве примера постараюсь назвать задачи, вытекающие из проблемы термоэлектричества.

Прежде всего, в противоположность простым монокристаллам радиотехники, в области термоэлектричества исследуются сложные соединения, и, следовательно, возникает проблема взаимосвязи физических свойств с кристаллохимической структурой. Иными словами, физика полупроводников сближается здесь с химией. Предстоит выяснить, на какой химической основе возникают сложные структуры зон, чем определяются большие значения эффективных масс, которые нужны для хороших термоэлементов.

Далее, изучение термоэлементов приводит нас к необходимости применения высоких температур. Действительно, переход от  $600^\circ$  к  $120^\circ$  К при тех же значениях  $Z = 1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{T^2}$  поднимает их кпд от 6—10 до 15—24%, а в перспективе при температурах порядка  $2000^\circ$  С намечается заманчивая величина кпд — порядка 50%.

При высоких температурах изобилие фононов перекрывает влияние отдельных дефектов структуры. Длины свободных пробегов как электронов, так и фононов снижаются до таких пределов, когда представление об этих параметрах теряет физический смысл, периодичность кристалла отступает на задний план и по своим свойствам он приближается к свойствам жидкости. А сколько нового таят в себе сами жидкие полупроводники из-



учение которых тормозилось предрассудком о невозможности их существования, поскольку вся теория полупроводников исходит из периодического поля! Мы склонны, например, ожидать, что длины пробегов в жидкости будут близки к атомным, в то время как опыт приводит к большим подвижностям, а следовательно, и длинам пробегов. Можно было бы также ожидать падения электропроводности после плавления, тогда как она повышается.

Экспоненциальный рост концентрации свободных зарядов в жидких полупроводниках, рост концентрации с отклонением от стехиометрического состава — все это напоминает зоны твердых полупроводников.

Металлы и сплавы, которые, казалось бы, потеряли свое значение для термоэлементов, при низких температурах вновь привлекают внимание.

Наконец, выдвигается проблема газообразных, частично ионизованных полупроводников, отличающихся от твердых лишь отсутствием расщепления валентной зоны.

С переходом к высоким температурам все большее значение приобретают процессы диффузии и характер примесей. Приходится также тщательно изучать влияние упругой и пластической деформации, термические напряжения и тепловое расширение материалов.

Следующая проблема, которая возникает при изучении термоэлементов, — это граница двух полупроводников. Она гораздо многообразнее, чем частный случай *pn* переходов внутри монокристалла, по обе стороны которых имеется одинаковая исходная среда. На границе или на резком градиенте физических свойств возникают сложные условия взаимодействия двух тел, отличающихся по контактному потенциалу, по ширине и структуре зон, по типу проводимости. Контактные потенциалы полупроводников в отличие от металлов зависят от смещения химического потенциала при введении примесей. От коммутации на границе двух ветвей термоэлемента требуется полное отсутствие сопротивления для носителей тока и в то же время возможно высокий запрет диффузии.

Первостепенное значение для термоэлементов имеет теплопроводность. Ведь термоэлемент — это в основном прибор, где 80% тепла переходит от горячего края к холодному и только остаток в генераторах превращается в электрическую энергию, а в холодильниках переносится от холодного края к горячему.

Приступая же к детальному изучению проблемы теплопроводности, мы прежде всего сталкиваемся с вопросом о длине свободного пробега фононов, а она зависит от степени ангармоничности тепловых колебаний, от условий переброса между акустической и оптической их ветвями и от нарушения периодичности решетки.

На первый взгляд формула Дебая и Пайерлса весьма проста: наряду с длиной пробега она включает лишь теплоемкость и скорость звука. Однако речь идет о групповой скорости фононов,

а не о фазовой скорости ультразвука, которая сравнительно легко измеряется.

Чтобы определить групповую скорость, приходится измерять спектры тепловых колебаний и зависимость их частоты от квазиимпульса. До последнего времени эти данные можно было получить лишь путем вычисления, причем, как оказалось, они были совершенно не верны. Только недавно с помощью нейтронного анализа удалось получить эти данные для германия и кремния. Расхождение средней групповой со средней фазовой скоростью фононов получилось примерно пятикратным. Поэтому попытки предсказать величину теплопроводности были обречены на неудачу.

Одновременно при отборе термоэлектрических материалов необходимо было оценить их теплопроводность и ее зависимость от внешних параметров, атомного веса, степени ионности химических связей, теплового расширения и т. п.

Важное значение имеет соотношение теплопроводности и подвижности в твердых сплавах, вошедших в практику термоэлементов. Возник вопрос о зависимости эффективной массы от температуры и других факторов.

Наконец, сильно усложнился вопрос о переносимой зарядами теплопроводности, в которой, помимо условия, вытекающего из закона Видемана—Франца, играет роль диффузия пар, а также о переносе тепла фотонами инфракрасного излучения.

Я назвал только несколько физических проблем, связанных с термоэлектричеством. Но ведь, помимо термоэлементов, могут возникнуть и другие применения полупроводников или новые их формы.

Своеобразие механических свойств полупроводников и явлений на их границах приведет, по-видимому, к важным техническим выходам. Вместе с тем проявятся еще не изученные стороны в полупроводниках, а интерес исследователей привлекут заброшенные пока материалы.

Среди других вопросов назову коллективные процессы в сегнетоэлектриках и ферритах. В связи с этим хочется вспомнить моих покойных друзей — И. В. Курчатова и П. П. Кобеко, которые выяснили физическую природу сегнетоэлектричества. Здесь возникают новые возможности концентрации электромагнитной энергии.

Немаловажное значение приобретают и экситоны, введенные в науку еще одним моим покойным другом — Я. И. Френкелем.

Не сомневаюсь, что дальнейшее развитие этих вопросов расширит и углубит наше понимание полупроводников. Первые 30 лет их истории дали уже богатые плоды. Радиотехника и измерительная техника достигли в выпускаемых приборах небывалой тонкости и многообразия. Созданы основы автоматик и телеуправления, выпрямления токов и фотоэлементов. Все это было связано с использованием *pn* переходов. А далее уже открыты

пути взаимных превращений тепловой, электрической, упругой, магнитной энергий. Осуществляется мечта овладения энергией Солнца. Это результаты дружной, настойчивой работы, в которой принимают участие ученые как США, Англии, Франции, ФРГ, так и СССР, Чехословакии, Польши и Китайской Народной Республики.

Наши конференции каждые два года подводят итоги тому, что сделали за это время физики, и объединяют их усилия. Но все, что мы сделали, — только начало длинного пути.

Статья опубликована в журнале «Вестник Академии наук СССР», № 12, 11, 1960, т. е. спустя два месяца после кончины А. Ф. Иоффе (14 октября 1960 г.). Она представляет собой текст выступления А. Ф. Иоффе 29 августа 1960 г. на конференции по физике полупроводников в Чехословакии.

## ПОЛУПРОВОДНИКИ И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

Развитие техники выдвигает все новые задачи, для решения которых требуются новые материалы. Так, развитие авиации привело к разработке легких сплавов, прогресс ракетостроения — к созданию тугоплавких и огнестойких материалов и т. п.

Наше время отмечено пластмассами и полупроводниками, которые подняли новые пласты технической целины.

До недавнего времени электротехника знала медь и изоляторы, машиностроение — железо, радиотехника сгорялась на вакуумных лампах. Всего 30 лет назад на техническом горизонте появились полупроводники — сначала как выпрямители переменного тока и фотоэлементы. С тех пор они широкой волной вторглись в радиотехнику, автоматику и сигнализацию, измерительную технику.

Уже свыше 20 производств базируется на полупроводниках, и это только начало мощного движения. Недалеко время, когда полупроводниковые термоэлементы и фотоэлементы перевернут основы энергетики, холодильной и отопительной техники, изменят соотношение постоянного и переменного токов в электротехнике и передадут в наши руки тончайшие средства, заменяющие искусство человека.

В широких кругах представление о полупроводниках связано с радиотехникой и отчасти с выпрямителями. Масштабы их производства в одних только США превышают миллиард долларов. Следует отметить, что при общем замедлении роста производства в США строительство новых полупроводниковых лабораторий и производство приборов из полупроводников там из года в год почти удваивается. Высок уровень полупроводниковой промышленности в Японии, быстро развивается она и в Англии, а ФРГ идет на первом месте по выпуску полупроводниковых выпрямителей.

Важность замены радиоламп полупроводниковыми диодами и триодами достаточно хорошо известна. Все знают, что в отличие от вакуумных ламп новые приборы потребляют во много раз

меньше электроэнергии, они не требуют предварительного подогрева, не боятся сотрясений, обладают громадной прочностью и долговечностью, что их можно изготавливать небывало малого размера. Ван Арденсу в ГДР удалось ввести полупроводниковую радиостанцию в человеческий желудок, а недавно у нас демонстрировали искусственный протез, в котором движения управлялись биотоками живого человека. В Ленинграде в Агрофизическом институте миниатюрные измерители температуры и влажности в непосредственной близости от растения позволяют самому растению в зависимости от протекающих в нем процессов автоматически включать и выключать свет.

Выпрямители переменного тока из закиси меди и селена еще десятилетие назад приводили к энергетическим потерям порядка 30%. Теперь, в эпоху германия и кремния, новые выпрямители снизили потери до 1—2% и решают задачи электролиза алюминия и других металлов, применяются на электротранспорте и в ряде иных мест, где нужен постоянный ток.

Третья область применения полупроводников — фотоэлементы — уже сделалась широко известной благодаря их использованию в спутниках и космических кораблях, где солнечные лучи становятся единственным и неизменным источником энергии. 10—15% этой энергии фотоэлементы превращают в электроэнергию. Однако стоимость кремниевых фотоэлементов еще настолько высока, что пока преждевременно говорить о больших масштабах превращения солнечной энергии в электрическую.

Зато недалеко уже возможность экономически выгодного получения электроэнергии за счет солнечных лучей при посредстве полупроводниковых термоэлементов, которые позволяют по-новому решать проблемы энергетики.

140 лет назад эстонский физик Зеебек открыл явление термоэлектричества, но неправильно его понял. В термоэлементах, как и в других тепловых двигателях, тепловой поток, идущий от горячего конца к холодному, частично переходит в другие виды энергии, в данном случае в электрическую. Отличительная черта термоэлементов, как и фотоэлементов, — выделение электроэнергии без промежуточных этапов, без паровых котлов и турбин, без вращающихся динамо-машин.

Это громадное преимущество, и оно скоро было осознано. Но пока материалы для термоэлементов изготавливались из металлов, кпд достигал нескольких десятых долей процента, а создаваемое термоэлементами охлаждение не превышало 5—6°. Поэтому термоэлементы применялись лишь для измерения температур.

Уже в начале первой пятилетки советские физики первыми в мире поняли преимущество полупроводников и еще перед войной получили около 3% кпд, а во время Отечественной войны изготавливали котелки с дном из термоэлементов, которые могли снабжать партизан электроэнергией для раций. После окончания войны котелки были заменены керосиновыми лампами с термо-

батареями, питающими радиоприемники. Таких термогенераторов было изготовлено несколько сот тысяч

Учитывая исключительное значение энергетики, я несколько подробнее остановлюсь на термогенераторах. Решающим в них является температура источника тепла. Если она не превышает  $300-400^{\circ}$ , то твердые полупроводники из теллуристого висмута или свинца дают термоэлементы с кпд до 8%. При  $700^{\circ}$  нам, по-видимому, удастся получить кпд 12—15%. Источники тепла с температурой  $1500-2000^{\circ}$  позволяют говорить уже о достижении кпд в 30—60%. Такая возможность была указана нами еще 10 лет назад.

Термоэлементы с кпд от 8 до 15% представляют большой интерес для получения электроэнергии от Солнца с целью использования ее в сельском хозяйстве и на транспорте.

Кпд порядка 50% и выше можно будет получать либо из газобразных полупроводников (плазма паров цезия), либо из вакуумных диодов, либо, наконец, из потоков ионизованных газов в магнитном поле. Каждый из этих путей может привести к цели, каждый требует преодоления своих трудностей. Опыт покажет, какой из них окажется наилучшим.

Термоэлементы находятся еще в стадии разработки и широко войдут в технику лишь в ближайшие годы. Но их можно уже сейчас использовать в холодильниках, нагревателях, термостатах. Таким приборам предстоит большое будущее, поскольку их показатели постоянно повышаются, а конструкция совершенствуется. Абсолютно реально их использование для охлаждения помещений летом и подогрева зимой, для регулировки температуры.

Я не упомянул о полупроводниках, концентрирующих магнитные и электрические поля (о ферритах и сегнетоэлектриках), измерительных приборах, стабилизаторах напряжения и многом другом, что характеризует современный этап техники и неосуществимо без полупроводников.

Попытаюсь резюмировать, что дают полупроводники и чего мы ждем от них.

1. Превращение почти без потерь энергии переменного тока в постоянный от долей ватта до тысяч киловатт.

2. Замена радиоламп с большой экономией электрической энергии при ничтожных габаритах, что сильно расширит область применения радиотехники и электроники.

3. Значительное упрощение и улучшение средств сигнализации, телеуправления и автоматизации производственных процессов.

4. Упрощение электронно-счетных устройств и создание систем, решающих самые сложные задания промышленности и сельского хозяйства.

5. Совершенствование измерительной техники.

6. Стабилизация напряжений и токов и преобразование всех параметров электрических схем.

7. Разработка фотоэлементов, превращающих световую энергию в электрическую. Использование солнечной энергии с помощью как термоэлементов, так и фотоэлементов.

8. Создание сегнетоэлектриков и ферритов, концентрирующих магнитные и электрические поля и превращающих электрическую и магнитную энергию в механическую, звуковую и другие виды энергии.

9. Разработка термоэлементов для прямого превращения тепловой энергии в электрическую с кпд порядка 10%.

10. Разработка термоэлементов, способных превращать высокотемпературную тепловую энергию в электрическую с кпд от 40 до 60—70%.

11. Использование потоков понижованных газов в магнитном поле, создающих электроэнергию с высоким кпд.

12. Развитие холодильной техники и кондиционирование воздуха в помещениях.

Мы только еще начинаем изучать и использовать жидкие и газообразные полупроводники и лишь вступаем в область высоких температур. Не без основания поэтому мы ждем гораздо больших результатов, считая достигнутые успехи лишь первыми шагами на длительном пути. Уже разработанные нужно передать производству, а перспективные скорее и шире развить в научных и отраслевых институтах, создав для этого необходимые материальные условия.

Статья опубликована в журнале «Вестник Академии наук СССР», № 11, 25—27, 1960. Это — первая посмертная публикация А. Ф. Иоффе.

# АГРОФИЗИКА

## ФИЗИКА НА СЛУЖБЕ АГРОНОМИИ

Задачей агрофизики — науки, захватывающей область, пограничную между агрономией и физикой, — естественно, следует считать активное воздействие на физические факторы, определяющие развитие растений.

Удобрения и всякого рода иные химические воздействия уже давно изучаются и используются в довольно широких, хотя и в недостаточных размерах. По линии физических факторов почти ничего систематического до сего времени не делалось. Мне кажется, тому есть две причины.

Одна из них исходит из представления о некоторой кажущейся безнадежности этого дела. Физические факторы, в противоположность химическим, большею частью рассматриваются как не подлежащие нашему воздействию, как некоторые космические факторы, данные нам от природы, как те внешние условия, в которых должна протекать вся наша техническая и агрономическая деятельность. Возьмем солнечный свет или почвенные условия. Всем этим можно пользоваться, но активно воздействовать или изменять эти внешние физические условия, в которых протекает жизнь растения, труднее, чем изменить химический состав почв при помощи введения в них недостающих элементов.

Такая точка зрения совершенно необоснованна. Это общее представление, часто не оформившееся, имеет свои корни в очень далекой религиозной фазе науки, когда считалось, что природа сама знает, как ей надо устраиваться, что бог устроил все наилучшим образом и что человеку в это дело вмешиваться не стоит, потому что лучше бога все равно ничего не сделаешь. Если отношение к этой проблеме и редко выражается такими словами, то во всяком случае общие суждения по этому вопросу именно таковы.

В частности, если говорить о растении, то следует считать неверным представление о наилучшем устройстве его в природе, о наилучшем его приспособлении теми или иными путями к условиям, в которых оно находится.

Одной из задач растения является конденсация солнечной энергии. Эта конденсация действительно производится, по производится в маслах, далеко не удовлетворительных.

Известно, что растения используют 1% той лучистой энергии, которую им дает Солнце, и что использование солнечной энергии растениями чрезвычайно разнообразно. В растениях, получающих весьма мало солнечной энергии, этот процент повышается до 20 и выше. В лабораториях ту же самую солнечную энергию могут использовать значительно больше — до 80%. Следовательно, нельзя сказать, что природа добилась действительно высоких показателей.

Если не связывать себя с общим представлением, согласно которому помогать природе незачем, и поставить вопрос, какими способами и в каком направлении должны изменяться физические условия развития растения для тех или иных конкретно поставленных задач, то здесь, мне кажется, открываются чрезвычайно большие возможности.

Проблему нужно разбить на две части: воздействие на среду, в которой произрастает растение, т. е. на почву и атмосферу, и воздействие на само растение, управление жизнедеятельностью самого растения.

Первый вопрос, который я поставил бы, — это вопрос о лучистой энергии, получаемой и излучаемой почвой. Между получаемой и излучаемой энергиями имеется существенное различие, которое и служит основанием для возможности активного воздействия на этот процесс. Можно придать почве такие свойства, чтобы она очень много поглощала лучистой энергии и сравнительно мало испускала. Чтобы это сделать, нужно изменить поверхностные свойства почвы.

Одним из довольно хорошо известных примеров являются стеклянные оранжереи или парники. Стекло имеет, очевидно, большие недостатки; оно недостаточно прозрачно для тех лучей, которые желательно было бы пропустить. Оно совершенно непрозрачно для ультрафиолетовых лучей и для фиолетовых лучей, которые играют существенную роль в жизни растений и животных. Оно недостаточно задерживает инфракрасные лучи, излучаемые почвой. Один из вопросов, который в течение этого времени был разработан в Физико-агрономическом институте, — это замена стекла другими материалами, более удовлетворяющими этим оптическим требованиям и в то же время не имеющими недостатков стекла. Такого рода материалом является органическая пленка. Ее преимущества заключаются в том, что она пропускает всю активную часть света. Инфракрасную часть спектра, которая соответствует лучеиспусканию почвы и которую желательно задержать, пленка поглощает значительно больше, чем стекло. В результате улучшения оптических свойств пленки получается в несколько раз лучшее использование солнечной энергии.

Возможности регулирования теплового баланса довольно обширны прежде всего в самой агрономии. Можно говорить о защите грунта при помощи пленки, можно говорить о лакировке земли, наконец, об окраске ее. Такого рода вопросы могут иметь



далеко не фантастическое звучание, а реальное воплощение в жизнь. Кроме чисто агрономических задач, благодаря этим способам имеется возможность перемещать границы получения тех или иных растений на север или на юг в зависимости от того, в какую сторону регулировать этот тепловой баланс.

Мы можем самым активным образом воздействовать на механическую прочность и на размываемость почвы водой, воздействовать на нее при помощи доступных в агрономии агентов. Введение в почву очень небольшого количества активных веществ, которое может измеряться десятками граммов на 1 га, способно резко изменить механические свойства и прочность почв.

Далее, можно говорить о воздействии и на само растение. Способов воздействия имеется несколько, начиная с воздействия электрическими факторами. Очень интересным и очень типичным примером такого физического воздействия являются биологические лучи, открытые проф. А. Г. Гурвичем. Вне всякого сомнения стоит вопрос о воздействии на растение света и лучистой энергии.

Комбинируя различные источники света с различным световым составом, комбинируя цвета с помощью фильтров, можно подобрать такой состав и такое количество искусственного электрического света, в котором растение будет развиваться нормально и правильно, не давая худосочных экземпляров. Например, фасоль, лук, томат, лен освещались электрическим светом без примеси естественного солнечного освещения в течение 40 дней и развились до нормального размера. Пшеница в этих условиях дает полный урожай в 45 дней. Это позволяет значительно ускорить селекцию. Во всяком случае вполне возможно в этих условиях без всяких затруднений получать шесть поколений в год. Возможно также получение без солнечного света различных овощей, что, очевидно, открывает значительные перспективы для Крайнего Севера.

Проблема физического воздействия на развитие растений и живогных совершенно реальна, уже сейчас можно наметить пути к активному воздействию на те факторы, от которых зависят жизнь и развитие растений.

Статья опубликована в Ленинграде в «Красной газете» (вечерний выпуск) от 7 декабря 1932 г.

Первые две статьи раздела «Агрофизика» настоящего сборника относятся ко времени планирования внедрения физики в агрономию — именно такие задачи и должен был решать созданный в 1932 г. по инициативе А. Ф. Иоффе Агрофизический институт. Остальные статьи подводят итог проведенных исследований и намечают их дальнейшую перспективу.

## СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО И ФИЗИКА

При коренной перестройке сельскохозяйственного производства мы пользуемся достижениями научной агрономии, которые в свою очередь определяются успехами и достижениями наук биологических. Однако нам издавна казалось, что отрыв агроно-

мии от физико-математических наук, отсутствие попыток использования достижений современной физики в различных отраслях сельского хозяйства — явление совершенно не нормальное. Физика, ведущая нашу промышленность и технику, также не делала попыток применить свои методы для разрешения агрономических проблем.

Весной 1932 г. в Ленинграде был организован Физико-агрономический институт. Два года работы этого института полностью оправдали наши предположения. Прежде всего оказалось возможным по-новому поставить ряд задач — мы не пошли по линии оценки эмпирических приемов земледелия, а поставили целью разработку активных методов и, следовательно, принципиально новых приемов воздействия на почву, растение и животное с целью повышения их продуктивности. Это отличает нашу работу от прежних направлений агрофизики.

В области активных воздействий на почву как среду для растений мы поставили себе три задачи: создание искусственной структуры почв, регулирование теплового их режима и воздействие в желательном для нас направлении на водный баланс пахотного слоя. Наше вмешательство в развитие растительного организма идет по линии изменения световых условий. Мы изучаем влияние отдельных участков спектра на жизнедеятельность растения и ведем подбор таких источников света, которые стимулируют рост, ускоряя созревание, или содействуют наибольшему накоплению органической массы. Воздействия на животный организм сводятся к детальному изучению влияния ультрафиолетового света на рост и продуктивность животного.

Остановимся на работах нашей молодой лаборатории физики почв. Исходя из опыта практического земледелия, создающего естественную структуру почвы при помощи посевных трав, органического удобрения, культурной вспашки, известкования и пр., и учитывая бесспорное влияние этих приемов на урожайность, мы попытались найти иной путь создания почвенной структуры. Идея сводится к тому, чтобы заполнить поры между частицами почвы некоторыми жидкостными системами (а в случае влажности почвы — и сухим «структурным удобрением»), способными затвердевать и крепко связывать почвенные частицы и агрегаты (комочки), прочные по отношению к воде. Эти системы не должны, конечно, нарушать биологические и физико-химические процессы, протекающие в культурной почве.

В основу выбора веществ была положена работа Д. Л. Талмуда, указавшего на возможность повышения энергии сцепления (склеивания) твердых тел путем введения весьма тонкого слоя поверхностно-активного вещества, названного им молекулярным припоем.

Принципиальная возможность создания искусственных почвенных структур была установлена лабораторией еще в прошлом году в опытах с чистым песком и почвами. Одновременно встал

вопрос о технологии структурообразующих веществ и детальном изучении физико-химических свойств искусственного агрегата почвы и того клея, который был при этом применен. Мы использовали, с одной стороны, промышленные и сельскохозяйственные отходы — сульфит, щелок, солому, отбросы вязкого производства и т. п., а с другой стороны, — торф, который также содержит значительное количество клеящих веществ, выделяемых 1%-ным раствором щелочи.

Весной текущего года мы впервые произвели варку структурных удобрений и испытали их на полевом опытном участке института. Несмотря на неблагоприятные почвенные условия для данного опыта (сушь), в течение всего лета опытные деланки выделялись гороховидной структурой почвы, прочной по отношению к дождям, а также темным цветом, имеющим значение для лучшего поглощения лучистой энергии Солнца. В основном опыте мы имели на контроле урожай в 14.4 ц с га; применение извести дало 16.0 ц, полного минерального удобрения — 18.3 ц. В то же время опытные деланки с торфяным клеем дали 23.7 ц, с коллоидом А (клей из сульфитного щелока) — 25 ц. Средние прибавки от структурных удобрений в 4—5 ц на га на песчаной почве дают основание надеяться на еще большую эффективность данного метода на тяжелых почвах (большинстве подзолов и сероземах Средней Азии).

Перейдем ко второму вопросу — регулированию теплового режима почвы. Как это ни странно, в научной агрономии вопросу тепла не уделялось должного внимания. Здесь совершенно неосновательно установилось мнение о невозможности управления факторами света и тепла.

В своих исследованиях мы исходим из соображений, что, изменяя оптические свойства поверхности почвы, можно увеличить поглощение лучистой энергии Солнца днем и уменьшить излучение тепловой энергии ночью. Наши прошлогодние опыты с ацетилцеллюлозной пленкой показали, что эта пленка может служить прекрасной защитой от излучения, но пока она слишком дорога для полеводства. Перед нами встал вопрос о замене пленки жидкими эмульсиями, затвердевающими на поверхности почвы с образованием пленки, обладающей пужными нам оптическими свойствами. Одной из таких эмульсий оказалась эмульсия из битума, которую мы широко испытывали в полевых условиях.

Здесь наши предположения также оправдались: в течение всего лета температура на опытных деланках держалась на 5—7° выше, чем на контрольных, в ясные же дни разница доходила до 10—12°. Битумная пленка играла и другую роль: она предохраняла поверхностные комочки почвы от разрушения их водою, одновременно уменьшая испарение из пахотного горизонта почвы. В этих опытах мы имели средние прибавки урожая в 3 ц с га.

Опыты, поставленные нами совместно с Институтом растениеводства в Гелкаре (Казахстан), указали также на возможность закрепления сыпучих песков путем пульверизации битумной эмульсии на поверхность почвы.

В приходно-расходном балансе почвенной влаги особое значение для питания растений имеет капиллярная влага (вода, находящаяся в тонких порах). В настоящее время нами ведутся испытания и подбор веществ, которые должны оказывать влияние на продвижение капиллярной влаги в почве и благоприятно сказываться на общем состоянии влажности пахотного и подпахотного слоя.

Создавая теорию и проверяя ее в поле на основе точной физической методики, мы можем постепенно подойти к разработке новых и более эффективных приемов агротехники.

Статья написана А. Ф. Иоффе совместно с его сотрудником по Агрофизическому институту проф. Ф. Е. Колясевым и опубликована в газете «Известия» от 16 ноября 1934 г.

## ФИЗИКА И СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

В ежемесячных трудах Академии наук за 1757 г. опубликована статья «О пользе, которую ученые физики приносят Экономии». В ней подчеркнуто первостепенное значение физики для сельского хозяйства. «Физика есть светило Экономии», — говорит автор. Он задает вопрос: «... как можно принудить землю, на которой родится только негодная трава и терние, чтоб украсилась цветами и плодами; чтоб произрастала полезныя травы, чтоб питала и размножала бесчисленное множество семян себе поверенных, не имея знания о качествах и силах... и о других вещах, которыя все зависят от Физики?» \*

Творцы русской агрономической науки XVIII в. — М. В. Ломоносов, А. Т. Болотов и И. И. Комов — придавали особенно большое значение физике. И. М. Комов писал в книге «О земледелии», что земледелие «ни что есть иное, как часть физики опытной, только всех полезнейшая». Таково же было убеждение профессора Московского университета М. Г. Павлова, который, наряду с курсом физики издал в 30-х годах XIX в. пятитомный курс сельского хозяйства, первый том которого носит показательное заглавие: «Физические основы земледелия».

Эту традицию продолжали передовые русские и советские агрономы — В. В. Докучаев, П. А. Костычев, В. Р. Вильямс. В. Р. Вильямс говорил мне, что мечтой его жизни было сочетание агротехники с физикой.

Со времен Ломоносова прошло 200 лет. Но далеко не в той мере, как можно было ожидать, физика вошла в земледелие.

---

\* Ежемесячные сочинения, к пользе и увеселению служащие. СПб., 1757, сентябрь, с. 254

Агрофизика нашла себе некоторое применение только в почвоведении.

Еще дальше современная физика и от животноводства. А между тем упомянутая уже статья 1757 г. отводит физике такое же решающее место в животноводстве, как и в земледелии. Она приводит пример «славного академика» Реомюра по разведению цыплят, «коими доказывается лутче, нежели всеми рассуждениями, тесный союз Физики с Економией» и другой пример Флорентийской Академии, созвавшей совещание для «приведения земледелия в лучшее состояние».\*

Существует резкий контраст между участием физики в прогрессе промышленного производства и в сельском хозяйстве. В прошлом это различие в значительной степени можно было объяснить мелкокустарным характером крестьянского хозяйства с преобладанием ручного труда. В таком хозяйстве нужны хорошие семена, нужны удобрения, но физике, казалось, нечего в нем делать. Нельзя пытаться изменить климат на участке в несколько гектаров.

За годы Советской власти характер сельского хозяйства изменился и вместе с тем исчезли препятствия для проникновения физики в сельскохозяйственную практику.

Просторы колхозных и совхозных полей, плановое социалистическое сельское хозяйство открывают путь активному воздействию на почвенные и климатические условия. Требования высокой продуктивности нашего земледелия не позволяют игнорировать такие важные факторы урожая, как свет, тепло, снабжение растений водой и углекислотой.

Почти полная механизация и растущая электрификация производственных процессов настоятельно требуют изучения физических явлений, обуславливающих работу орудий и производимые ими операции. Ведь между комбайном и текстильным агрегатом меньше различия, чем между оборудованием химического производства и машиностроительного завода. А между тем все внимание физиков отдано промышленности.

В качестве наглядного примера сравним роль физического знания в обработке металлов, с одной стороны, и в обработке почвы — с другой.

Нельзя сказать, что пахота имеет меньшее народнохозяйственное значение, чем резание металлов, или что почва менее достойный объект физического исследования, чем металл.

Процессы горячей и холодной обработки металла тщательно изучаются физикой на протяжении многих десятилетий. В постоянном взаимодействии с практикой выросла научная теория и быстро развивается производство; на хорошо проверенной почве научного знания расцветают успехи стахановцев-скоростников.

---

\* Там же, с. 255.

Появляются все новые орудия и приемы: фреза, искровая обработка изделий, химическая полировка, новые приемы сварки.

Для контроля качества продукции привлечены все средства физики: спектральный и рентгеновский анализ, магнитная и ультразвуковая дефектоскопия, интерференционные методы.

По сравнению с этим наука об обработке почвы находится еще в начальной стадии развития. Процесс рыхления и оборота пласта мало изучен; основные представления здесь не убедительны, а закономерности не установлены. Имеется только грубая оценка затрачиваемой работы и потребляемого топлива, хотя оно обходится стране во много миллиардов рублей. За две тысячи лет современный плуг не так далеко ушел вперед от его предшественника.

Можно было бы подумать, что в этом деле нет и не может быть новых путей. Но это неверно! Подача электрического потенциала на плуг снижает затраты энергии в зависимости от свойств почвы на 5—15%. Правильно подобранной вибрацией можно уменьшить затрачиваемую работу почти вдвое. Как скажется использование при обработке почвы принципа фрезы или пилы? Каковы перспективы ультразвука как средства рыхления и измерения глубины вспаханного слоя? На эти вопросы нет ответа, хотя успех одного из этих приемов сэкономил бы миллиарды рублей, а может быть, и повысил бы качество обработки.

Важнейшие процессы движения тепла, воды и углекислоты в почве и припочвенном слое воздуха, конечно, знакомы агротехникам, но не имеют своей теории.

Только недавно была разработана математическая теория распространения тепла в такой сложной и неоднородной среде, какой является почва. Изучаются разнообразные пути передвижения влаги со своими специфическими закономерностями, явления внутрипочвенной конденсации, испарения как с поверхности почвы, так и транспирация с растительного покрова.

Взамен теории и за ее отсутствием агротехника довольствуется первой ее стадией — качественным обобщением практического опыта.

Можно ли себе представить и можно ли допустить, чтобы в Советском Союзе, всеми звеньями опирающемся на передовую науку, важнейший участок народного хозяйства и производственная деятельность большинства населения строились на эмпирических данных, не освещенных точной теорией?

А ведь это так! Агрономы не знают физики — она практически отсутствует в системе агротехнического образования, а физики не знают и не интересуются агротехникой. Среди работников сельского хозяйства нет физиков, поэтому чисто физические исследования, когда они необходимы, производятся людьми, слабо знакомыми с основами физических знаний.

Вспомним, например, обработку почвы. Существует ли теория физических изменений, которые вносит плуг в почву, теория

рия резания и рыхления почвы, прилипания и перемещения ее? Первые намски такой теории были предложены проф. В. П. Горлячкиным, но сам он считал, что теория пахотных орудий — дело отдаленного будущего.

Физическая теория агротехники еще только зарождается.

Задача систематического использования достижений физики в земледелии впервые была поставлена в Советском Союзе 20 лет тому назад в связи с осуществлением широкой коллективизации. С этой целью в системе Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В. И. Ленина был организован Агрофизический институт, пока единственный в мире.

Слабо оборудованный институт с небольшим числом сотрудников, сочетающих агротехнические и физические знания, не мог развернуть проблему агрофизики во всем ее объеме. Тем не менее мне не раз придется сослаться на опыт Агрофизического института для иллюстрации того, что физика может сделать для сельского хозяйства.

Важнейшая задача физики — это изучение, а потом и активное воздействие на использование растениями света, на тепловой и водный режимы.

С этой целью агротехника выработала целый ряд приемов, проверенных многолетней практикой. Но насколько возрастет наша власть над физическими факторами урожая, когда мы будем точно знать требования растений и когда агротехника получит возможность опереться на количественную теорию процессов, протекающих в почве, в растении, в окружающем воздухе! В такой теории данные биологии и химии сочетаются с законами физики.

Возможно точнее определив потребности определенных культур, нужно разработать агротехнические приемы удовлетворения этих потребностей.

Насколько плохо мы изучили потребности растений, наглядно показывает факт неполноценных урожаев овощей, получаемых в наших теплицах и оранжереях. А уж, казалось бы, здесь все в наших руках — и свет, и тепло, и вода, и питание.

До последнего времени считалось, что именно красные лучи ответственные за развитие растений. Опыт же показал, что растения требуют освещения, которое преобладает в солнечном спектре и к которому приспособлен глаз человека. Только при таком освещении получают полноценные овощи. Как и следовало ожидать, исходя из факта приспособления растения к условиям внешней среды, требования к источникам освещения для светокультуры растений те же, что и для животных и человека.

Считалось, что слабое освещение должно сопровождаться низкой температурой. На самом деле, наоборот, при недостаточном освещении нужна высокая температура почвы и помещения.

Неправильные представления существовали и о количестве света, о способах обогрева теплиц, о фотопериодизации.

Приспособив к потребностям данной культуры силу и спектральный состав света, длительность искусственного освещения в сочетании с естественным, подобрав правильные тепловой и водный режимы, в закрытом грунте в короткие сроки можно, как оказалось, получать большие урожаи овощей с повышенным содержанием сахара и витаминов.

Из отдельных результатов светокультуры назову: десятикратное ускорение развития древесных культур, получение 5—6 урожаев пшеницы в год, выращивание хлопка за 90 дней, томатов за 60 дней и редиса за 15 суток.

Главное препятствие широкому распространению светокультуры — ее дороговизна. Но и она преодолевается по мере овладения спецификой закрытого грунта. Использование точных физических методов открыло ряд закономерностей, определяющих необходимые для светокультуры условия света, тепла и питания. На этом примере можно было проследить, как физические методы вносили ясность в запутанную и мало изученную область явлений и сделали ее доступной количественному расчету. На основе полученных данных можно обосновать экономику закрытого грунта и реально поставить задачу круглогодичного снабжения городов овощами. Можно надеяться, что обогрев неиспользованным теплом заводов и фабрик, газовые светильники, водные культуры еще более снизят расходы и сделают светокультуру экономически выгодной.

Всякому понятна важность изучения условий, в которых протекает жизнь растений, но можем ли мы изменить их в желательную сторону в полевых условиях?

Опыт Агрофизического института позволяет положительно ответить на этот вопрос. Вот несколько примеров. Культура картофеля в северных районах Союза часто страдает от ранних осенних заморозков, губящих ботву и останавливающих рост клубней. Р. Н. Асейкин (погибший в Отечественную войну), развивая идеи основоположника агрометеорологии П. И. Броунова, указал, что в почве и в воздухе во время заморозков еще немало тепла, тогда как температура листьев значительно ниже нуля. Он пришел к заключению, что посадка картофеля на разреженных высоких гребнях, расположенных по направлению ветра, может предохранить ботву от гибели за счет тепла, еще в избытке запасенного в почве.

Действительно, восьмилетние опыты в Карело-Финской республике и Мурманской области показали, что гибель картофеля на гребнях никогда не превышала нескольких процентов, тогда как рядом на гладком посеве заморозки губили иногда свыше 90%. В результате более крупные, дольше развивающиеся клубни давали на гребнях превышение урожая на 30—40%, несмотря на меньшее количество посадочного материала. Сейчас этот прием принят на севере в производственных масштабах.



Расчет и опыт показали, что на глубине 10 см в верхней части гребня и дном, и ночью на всем протяжении весны и раннего лета температура выше, а водный режим лучше как при недостаточном, так и при избыточном увлажнении и заболачивании. Поэтому использование приема посадки картофеля на гребнях дает и в Ленинградской области большие урожаи раннего картофеля.

Гребневая культура хлопка в Средней Азии в отличие от гладкого посева сохраняет после полива почвенную структуру, улучшает тепловые условия и приводит к повышению урожая хлопка до 20%. Эти же обстоятельства объясняют успех приема проф. Н. Г. Жучкова в разведении плодовых садов на валах.

Гребневая культура — один из примеров улучшения теплового режима на севере или сохранения структуры почвы при поливах на юге.

Опыт показал, что соответственным выбором рельефа и размещения растений можно изменять энергетический баланс и влиять на световой режим, улучшая микроклимат и приспособляя его к требованиям возделываемой культуры.

Были предложены и испытаны в полевых условиях различные средства воздействия на почву. Для того чтобы придать почве комковатую структуру и проверить значение такой структуры, были разработаны приемы внесения вытяжек из торфа и отходов производства, например сульфидных щелоков (задолго до шума, поднятого в США вокруг создания искусственной структуры крилиумом). Искусственные почвенные структуры по своей водопроницаемости не уступают чернозему, и в то же время они служат удобрением, заметно повышая урожай.

При помощи небольших добавок мылонафта можно сделать почвенные частицы несмачиваемыми водой. Получающаяся таким путем гидрофобная земля прекращает фильтрацию и проникновение воды, создает хорошую тепловую и электрическую изоляцию.

Одно из покрытий, испытывавшихся на почве, — распыленная эмульсия битума — оказалось хорошим средством закрепления развеваемых песков и зарастания пустынь растительностью. Многолетние испытания этого приема в Кара-Кумах и на нижнеднепровских песках показали, что образующаяся после разбрызгивания эмульсии битумная пленка прочно закрепляет пески даже при ураганных ветрах, а посаженные под пленкой семена или черенки дают устойчивые всходы; хорошо развиваются в этих условиях и травы. При осмотре посадок, произведенных в Кара-Кумах 15 лет тому назад, на опытных участках были обнаружены сотни деревьев саксаула высотой до 3 м с широкою кроною. На битумизированных участках Нижнего Днепра также хорошо выросла сосна.

Испытание больших органо-минеральных гранул явилось интересной попыткой использования высокого осмотического дав-

ления концентрированного раствора, для того чтобы сохранить в грануле влагу и таким образом в течение всего вегетационного периода поддержать питание растения на достаточно высоком уровне.

Гранула пронизывается корневой системой растения, которую она питает удобрениями, при сравнительно высокой влажности, притягиваемой из окружающей почвы ее гигроскопическими составляющими. Урожай овощей повышается при этом на 50—100 ц с 1 га.

Разумеется, приведенные факты не исчерпывают наших возможностей воздействия на физические факторы — они только иллюстрируют на отдельных примерах реальность поставленной задачи.

Мы еще не научились управлять климатом и делать погоду. Но Центральный институт прогнозов предсказывает ее (удачно, а иногда и неудачно) на ближайшие дни и месяцы. Исходя из этих данных, можно, как оказалось, дать прогноз температуры в пахотном слое почвы на различных глубинах на две недели вперед, что небесполезно знать в периоды сева. Можно с уверенностью предсказать с вечера утренний заморозок. Когда достоверность прогнозов возрастет, можно будет иметь сведения о ходе температуры и влажности не только в воздухе, но и в почве за время вегетации и соответственно этому построить агротехнику.

Изучение в последние годы поливного хозяйства на Волге и в Ростовской области, и в частности влияния мощных однократных осенних поливов (влагозарядки), позволило установить, какая часть поливной воды используется растениями и какая уходит в глубокие горизонты, недоступные для корневой системы; как возникает засоление почв и как его предотвратить. Было изучено взаимодействие теплового, радиационного и водного режимов за весь вегетационный период, развитие растительного покрова и его конечный результат — урожай — по сравнению с лишенными полива массивами.

При этом выяснилось, что когда образовался растительный покров, основным расходом воды оказалась транспирация, которая, как было установлено, не зависит от влажности почвы, пока влажность выше 60% полевой влагоемкости. В этих условиях необходимая растению вода определяется радиационным балансом, т. е. разностью между поступающей солнечной энергией и излучением растительного покрова. На каждые 600 кал поглощаемого тепла расходуется 1 кг испаряемой воды. Эта связь показывает, какую большую роль в транспирации растений играет требование предотвратить их перегрев. Всего 10% тепла уходит в почву.

Таким образом, в указанных условиях по радиационному балансу данного района можно судить о необходимом количестве поливной воды.

Агрономы пользуются громоздкими и несовершенными измерительными приборами для таких физических показателей, как влажность воздуха и почвы, температура поверхности, испарение почвой и растениями. Некоторые из общепринятых приборов показывают совсем не то, что интересует агронома. Вообще не существует прибора для учета конденсации, для наблюдения за движением в почве воды и питательных веществ.

Так, например, температуру поверхности почвы и температуры на различных глубинах принято определять при помощи ртутных термометров. Легко представить себе, в каких условиях приходится отмечать положение ртутного столбика, как нужно наклоняться и как повреждается при этом растительность. Так же обстоит дело и с измерением влажности психометрами Ассмана с двумя термометрами при их обдувании воздухом. Все это измерительные приборы XIX в.

Между тем современная метрология, количественно учитывающая тончайшие изменения, несомненно могла бы справиться с требованиями, предъявляемыми агротехникой и растениеводством. Для этого следовало бы обратиться к богатому арсеналу средств современной физики.

Многие физические измерения чрезвычайно облегчаются применением радиотехнических приемов, широко вошедших в технику эксперимента. Использование полупроводниковых приборов взамен вакуумных ламп еще больше упрощает задачу. Дешевизна и массовость изготовления, механическая прочность (весь прибор — это камешек размером в 2—3 мм), отсутствие накала нити, необходимой в вакуумных лампах, и вытекающее отсюда малое потребление электроэнергии делают полупроводниковую радиотехнику особенно пригодной в условиях сельского хозяйства.

Полупроводники решают и другие измерительные задачи. Например, прибор в виде крупинки в несколько десятых миллиметра измеряет температуру листа, температуру и влажность воздуха, температуру почвы на любой глубине или на поверхности, причем, как и всякий электрический прибор, он позволяет регистрировать показания и наблюдать издали.

Полупроводниковые фотоэлементы определяют освещенность как на поверхности, так и внутри травостоя или в лесу.

Физика должна быть также использована для улучшения бытового обслуживания колхозников. Например, термоэлектрическая батарея, помещенная над стеклом керосиновой лампы, питает электроэнергией радиоприемник и приобщает, таким образом, к радиовещанию самые отдаленные, еще лишенные электричества уголки нашей Родины. Радио становится доступным на Крайнем Севере, в горных и пустынных районах, на лесоразработках, при прокладке дорог и т. п. Тысячи колхозов уже снабжены полупроводниковыми термобатареями.

Такие же, но только более мощные термоэлектрические батареи из полупроводников могут обеспечить электроэнергией ра-

диостанции машинно-тракторных станций и систему радиоуправления работой тракторов и машин в поле, могут обеспечить полевые работы электрическим освещением.

Полупроводники могут разрешить и другую важную для сельского хозяйства задачу — сохранение скоропортящихся продуктов путем создания холода.

«Как скоро сельские труды будут учреждаемы просвещенными людьми, земледелие также будет в почтении, как и другая художества, и очищенная нами земля не откажет нас наградить изобилием плодов своих»,\* — так заканчивается упомянутая статья XVIII в.

Сформулируем теперь важнейшие задачи физики в сельском хозяйстве.

Во-первых, приспособление светового, теплового и водного режимов к потребностям выращиваемой культуры, к почве и климату района: в частности, тепловая мелиорация для северных районов, зимняя агротехника, рациональное использование солнечного света и почвенной влаги, борьба с фильтрацией в поливном земледелии. Селекция может еще более успешно содействовать продвижению культур в иные климатические зоны, если ей удастся сознательно изменить оптические, термические и механические свойства и транспирацию.

Во-вторых, изучение процессов, связанных с сельскохозяйственными работами: в частности, теория обработки почвы, механизм и законы движения воды и тепла в почве, изучение почвенной и воздушной углекислоты, влияние физических факторов на растения и микрофлору, процессы сушки зерна и трав, очистка зерна, разработка на основе теории пахотных орудий приемов снижения затрачиваемой орудием работы при помощи электросмазки, вибрации и т. п. приемов, испытание новых путей рыхления и перемещения почвы.

В-третьих, внесение передовых методов и приемов современной физики в изучение процессов в почве и в растениях с целью разработки количественной агротехнической науки. Широкое применение метода радиоактивных индикаторов, математическая формулировка важнейших закономерностей.

В-четвертых, выращивание овощей в закрытом грунте и при искусственном освещении для получения ранних овощей и круглогодичного снабжения городов свежими овощами. Рациональная экономика светокультуры, выбор источников света, использование отходов тепла, гидротеплицы, искусственные почвенные структуры.

В-пятых, создание физических приборов, измеряющих важнейшие показатели сельскохозяйственного производства. Автоматизация и телеуправление производственными процессами.

---

\* Там же, с. 270.

В-шестых, улучшение и автоматический контроль за условиями хранения и транспортировки продуктов сельского хозяйства с использованием холодильной техники, рациональных приемов сушки, защиты от действия влаги и кислорода воздуха.

Можно наметить аналогичные формы участия физики в животноводстве — эти вопросы принято относить к биофизике. Если в растениеводстве физика имеет в нашей стране свою историю и некоторые, хотя и небольшие, достижения, то в животноводстве до последнего времени физика не принимала почти никакого участия.

Научная основа как растениеводства, так и животноводства — биология. Но нельзя рассматривать организм в отрыве от условий его существования. Поэтому биолог вынужден обращаться к почвоведу, агрохимику, агрофизику.

Тем более невозможно оторвать физические явления в живой природе от их биологической основы; тепловые и водные свойства почвы, ее структуру от действия микрофлоры, от влияния корневой системы. Карикатурой на агрофизику выглядит попытка представить почву как собрание капилляров или губку, снабжающую растение водой.

Как ни велика, по нашему убеждению, роль физики в сельском хозяйстве, не следует забывать, что физические воздействия — только вспомогательное средство для лучшего произрастания растений.

Поскольку урожай определяется условиями внешней среды, физика и химия — мощное средство повышения урожайности полей.

Социалистическое земледелие быстрыми темпами оснащается все новыми машинами и орудиями, сельскохозяйственная практика все теснее связывается с физикой и механикой.

Нетерпимо поэтому такое положение, когда сельскохозяйственная практика игнорирует такое мощное орудие своего роста, как достижения физики, когда индустриализированное сельское хозяйство ограничивается традиционными приемами тысячелетней давности. Не приходится доказывать, что, приспособив световой, тепловой и водный режимы к потребностям растения, мы повысим урожай, при этом в новые районы продвигнутся южные культуры, оживут обширные пространства нашего Севера и пустынные области Юга.

Наши физики своим участием в промышленности, успешным решением порученных им актуальных и трудных задач уже доказали, что они могут принять деятельное участие и в подъеме нашего сельского хозяйства. Социалистическая система устраняет все препятствия, стоящие на пути к достижению этих целей. Необходимо направить физику и советских физиков на великое дело помощи сельскому хозяйству; необходимо широко открыть новый сельскохозяйственный фронт физического знания. Агрофизика не менее необходима, чем радиофизика, металлофизика.

В систему сельскохозяйственного образования нужно ввести изучение основ физики, издав учебник физики для сельскохозяйственных вузов, и в университетах и сельскохозяйственных вузах готовить кадры ученых-агрофизиков.

Тематику исследовательской работы кафедр физики сельскохозяйственных вузов нужно направить в сторону интересов сельского хозяйства.

Нужно организовать производство рациональных физических приборов для сельского хозяйства и снабдить ими зональные и опытные станции, а по мере роста кадров агрофизиков направлять их на эти станции.

Советская агрофизика должна во всех своих звеньях изучать и обобщать опыт передовиков сельского хозяйства, тысячелетний опыт прошлого и достижения агротехники как в СССР, так и за рубежом.

Чем скорее и полнее удастся включить в агрономическую науку физические знания, физические методы и физические приборы, тем скорее и успешнее будут решены задачи дальнейшего развития сельского хозяйства нашей страны.

Статья опубликована в журнале «Природа», № 7, 3—9, 1954. Под тем же названием, но в расширенном варианте эта статья была издана отдельной брошюрой в Алма-Ате на казахском языке.

## СОВЕТСКАЯ АГРОФИЗИКА

Начиная со времен Ломоносова лучшие русские агрономы всегда подчеркивали роль физики в земледелии. И тем не менее только в Советском Союзе впервые была четко поставлена задача развития агрофизики как составной части агрономической науки.

25 лет тому назад в системе Всесоюзной ордена Ленина академии сельскохозяйственных наук им. В. И. Ленина был организован Агрофизический исследовательский институт. В начальный период его деятельности трудно было создать кадры агрономов, владеющих современной физикой, и подыскать физиков, склонных посвятить себя решению агрономических задач.

Немало ошибок, а также не доведенных до конца и потому недостаточно убедительных опытов можно найти в истории исканий нового института. Но тем не менее здесь постепенно создавалась физика почвы, биофизика растений, открывались пути воздействия на микроклимат; выросла теория движения воды в почве при различных состояниях влажности; установлена связь испарения, а следовательно, и потребности растений в воде с тепловым балансом солнечной энергии. Здесь получили свое начало рациональные пути определения норм поливов в засушливых местностях. Определив потребности данной культуры в свете, тепле и влаге, мы научились выращивать ее в наиболее выгодных условиях. Растущие успехи физики и техники открывают

все новые возможности и ставят новые задачи перед агрофизикой.

Так, ядерные излучения, изотопы, ядерная энергия — это новый этап в использовании физики для целей сельского хозяйства.

Немало полезных применений находят полупроводники. Они не только облегчают измерение и изучение процессов в почве, растениях и в животных, но и позволяют снабжать колхозы электроэнергией, предохранять продукты от гниения и порчи, обеспечивая радиофикацию и кинофикацию села.

Громадное значение должны получить электронно-счетные машины, которые могут легко учесть тысячи обстоятельств. Если все те правила, которые известны агроному, его интуицию перевести на язык точных математических закономерностей и «вложить» их в машину, ее вывод будет единственно возможным и окажется правильным, если правильны были «заложенные» в машину законы.

Из этого положения вытекает важнейшая задача агрофизики — перевести правила агрономической науки на язык математических формул, превратить их в законы природы и научиться учитывать всю их совокупность.

Помимо тех задач, которые Агрофизический институт пытался решать в течение первой четверти века своего существования, перед ним встают, следовательно, еще новые направления работы, вытекающие из ядерной физики, физики полупроводников и появления электронно-счетных машин.

Попытаюсь описать характер и результаты работ Агрофизического института за четверть века его существования.

Свет. Фотосинтез — одно из важнейших и давно известных явлений живой природы. Это — источник основных запасов энергии: угля, нефти, торфа, дров.

Исследованию фотосинтеза посвящены сотни работ, в том числе классические исследования К. А. Тимирязева. Метод изотопов помог вскрыть механизм химических процессов, вызываемых светом, хотя до сих пор не изучена роль первичного акта фотоэффекта и участие свободных радикалов. Эти задачи только теперь ставятся институтом в связи с обновлением его тематики.

Работы института были направлены на выяснение оптимальных условий сочетания света, тепла и влаги и на установление наилучших условий освещения для каждой данной культуры.

При этом освещение характеризовалось следующими количественными показателями: 1) соотношением длительности периодов освещения и темноты на протяжении суток; 2) мощностью светового потока и мощностью затрачиваемой электроэнергии; 3) спектральным составом света.

Хотя влияние этих характеристик изучалось и ранее, но часто методически неправильно, в результате чего создались и укоренились неверные представления о сочетании света и тепла, об оптимальном спектральном составе для выращивания расти-

тельных культур с помощью искусственных источников света. Применение более совершенной методики, установление точных количественных закономерностей не замедлило сказаться на результатах. Светокультура все больше приближается к положению метода практического выращивания овощей и снабжения ими в холодное время года населения городов и промышленных центров.

По содержанию сахаров и витаминов овощи, выращенные при правильно выбранных условиях искусственного освещения, превосходят продукты, выращенные в обычных летних условиях. В результате более глубокого изучения вопроса удается все больше снижать затраты электроэнергии. Мы смогли значительно уменьшить длительность вегетационного периода: до 60 дней для томатов при урожае до 80 кг с 1 м<sup>2</sup> освещаемой поверхности в год, до 15 дней для редиса и т. п. Пшеница дает до 6—7 урожаев в год.

При помощи разработанных в институте оригинальных тонких методов исследования (микротермисторов и микрогигрометров) были вскрыты новые стороны физиологических процессов. Так, систематическая запись хода транспирации показала ее периодический характер, влияние освещения, периоды индукции, реакции, напоминающие явления условных рефлексов, и многое, чего еще не знала физиология растений.

Как всегда в истории науки более точная методика, новые приборы, расширяющие пределы измерений, позволили открыть новые черты в давно известных явлениях природы. Это относится не только к вопросам действия света, но и к изучению структуры почвы, ее увлажнения и т. д.

Структура почвы и ее механические свойства. Почвоведение — один из разделов агрономии, получивший особое развитие в нашей стране. Классическим исследованиям русских ученых почвоведение обязано своими важнейшими успехами.

Применение институтом достижений современной физики и химии внесло в эту область сельскохозяйственной науки полные результаты.

Анализ явлений структурообразования, склеивания почвенных частиц, полимеризации позволил сформулировать общую теорию структурных свойств почвы. Применение доступных склеивающих веществ помогло на примере искусственного структурообразования получить высокую эффективность структурных почв.

Вопросы обычной и скоростной обработки почвы могли быть количественно изучены благодаря разработке нового прибора «рабботомера», точно измеряющего производимую трактором работу.

Теплота. Обширные систематические исследования тепловых процессов в почве и изготовление серии соответствующих приборов, разработанных институтом, привели к важному результату. Была создана и математически сформулирована теория дви-



жения и накопления тепла в почве в зависимости от условий ее влажности, пористости и других свойств. Впервые были составлены и решены дифференциальные уравнения распространения тепла в почве. Исследованы все явления, влияющие на энергетический режим, важнейшим из которых является испарение. Установлена прямая связь теплового баланса с процессами испарения и транспирации.

Созданы методы прогноза температуры в почве и заморозков, разработаны приспособления, позволяющие легко и своевременно производить необходимые для прогноза расчеты.

Разработаны приемы тепловой мелиорации для районов с недостатком тепла. Важнейшим из них является гребневая посадка картофеля и кукурузы, ускоряющая развитие этих растений.

Вода в почве. Столь же тщательно, как и распространение тепла, изучалось движение и накопление воды в почве. Экспериментально и теоретически были изучены вопросы перемещения воды при различной влажности почвы и движения воды под влиянием силы тяжести, градиентов влажности, температуры и упругости водяного пара.

Удалось облечь результаты этих исследований в форму математических уравнений и установить количественную меру суммарной адсорбционной поверхности данной почвы. Изучены процессы испарения воды почвой и внутрипочвенной конденсации водяного пара.

В качестве практических выводов было предложено прикатывание почвы тяжелым катком, внесение крупных органо-минеральных гранул и другие мероприятия, проверенные на десятках тысяч гектаров.

Воздух в почве. Воздухообмен в почве не привлекал к себе необходимого внимания агрономов. Между тем элементарные факты свидетельствуют о его большом значении для успешного развития растения. Сотрудники института, исходя из теории диффузии газов, выяснили связь ее с плотностью и влажностью почвы. Кроме того, они исследовали роль колебаний барометрического давления и температуры, роль осадков. Особое внимание было уделено изменению состава почвенного воздуха в результате действия микроорганизмов.

На основе этих работ удалось дать удовлетворительное объяснение наблюдаемой на опыте устойчивости химического состава, и в частности постоянства содержания углекислоты в почвенном воздухе, и оценить значение плотности почвы.

Приборы. Немаловажную сторону деятельности Агрофизического института составляет разработка научно обоснованных методов исследования сельскохозяйственных процессов и приборов для их измерения.

Нельзя не заметить, что приемы агрономических измерений далеко отстали от современной измерительной техники. Институт в значительной степени исправил этот недостаток.

Еще недавно единственным прибором для измерения температур был ртутный термометр, для измерения влажности воздуха — психрометр Ассмана. Измерения производились в определенные часы дня, причем для определения условий в растительном покрове приходилось нарушать нормальные условия жизни данной сельскохозяйственной культуры.

Легко понять, насколько полнее оказываются наши сведения об условиях роста, когда полупроводниковые приборы, размещенные в интересующих нас местах, систематически и непрерывно записывают на ленту температуру почвы и воздуха на различных высотах, его влажность, освещенность и другие условия, в которых развиваются растения. Приборы Агрофизического института определяют освещенность, температуру, влажность в любой точке растения или его окружения.

Сушка зерна, прочность колоса, температура листа во время заморозков — эти и многие другие величины получили свои измерительные приборы.

К сожалению, до сих пор почти все эти приборы изготавливались небольшими производственными мастерскими института в очень ограниченном количестве, тогда как потребность в них для сельского хозяйства Советского Союза измеряется сотнями тысяч экземпляров.

Поэтому неотложной задачей деятельности Агрофизического института является постановка массового производства разработанных им приборов для опытных станций, передовых совхозов и колхозов.

Некоторые практические мероприятия. В числе других работ Агрофизического института необходимо упомянуть о разработанной им системе закрепления развеваемых песков при помощи битумной эмульсии и приемов облесения пустынь. Эта система прошла длительную успешную проверку как на песках Кара-Кумов, так и в низовьях Днепра.

Несомненный успех имела также предложенная институтом гребневая посадка картофеля, кукурузы, хлопчатника и плодовых пород. Но, помимо таких отдельных мероприятий, немалое значение Агрофизического института заключается в создании прочной физической базы для агрономической науки.

Замечательная дата — 40-летие Советской власти — заставляет тщательно посмотреть пройденный путь и, оценив новые возможности, созданные прогрессом физики, поставить перед Агрофизическим институтом более серьезные задачи.

Ядерная физика дает новые средства воздействия на растения, новые методы изучения растений и почвы и их взаимодействия, механизма питания, поступления и движения влаги, транспирации. Это должно привести к ряду полезных агрономических рекомендаций.

Задачи института, однако, не ограничиваются изучением этих вопросов. Ядерные излучения служат мощным источником

энергии, влияют на наследственные признаки растений и животных, облегчают их приспособление к условиям среды. Мало того, нельзя забывать об опасностях, связанных с испытаниями ядерного оружия. Исследования поглощения радиоактивных осколков почвой, перехода их в растения и в организм животных будут включены в тематику института.

Полупроводники также должны занять обширное место в тематике Агрофизического института. Они позволяют наблюдать за всеми деталями в жизни растений, открывают путь к автоматизации сельскохозяйственных процессов. Наряду с этим полупроводники могут способствовать электрификации сельского хозяйства.

Наконец, большое применение могут найти охлаждающие устройства для сохранения скоропортящихся продуктов, а также установки для отопления и поддержания постоянной температуры в жилых и производственных помещениях, в животноводческих хозяйствах. Все это возможно осуществить при помощи полупроводников, без сложных машин и дорогих сооружений.

В сфере внимания института должны находиться и электронно-счетные устройства.

Помимо новых направлений работы института, прежняя его тематика будет поднята на большую высоту и ближе связана с потребностями сельского хозяйства.

Большим пробелом в работе Агрофизического института была установка на одностороннее развитие растениеводства и забвение интересов животноводства. Уже в первые годы после создания института отдел животноводства был передан институту экспериментальной медицины. Необходимо вернуться к этим вопросам, поскольку увеличение производства молока, масла и мяса является сейчас важнейшей задачей нашего сельского хозяйства.

Статья опубликована в кн.: Материалы юбилейной сессии ВАСХНИЛ, посвященной 40-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции. М., 1958, с. 207—211.

# РАЗВИТИЕ СОВЕТСКОЙ ФИЗИКИ

## НАД ЧЕМ РАБОТАЮТ СОВЕТСКИЕ ФИЗИКИ

### НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА В СССР

За несколько последних десятилетий стерлась резкая грань между так называемой чистой наукой и техникой.

Завоевания мысли превращаются на наших глазах в технические формы: побеждаются расстояния, заливаются светом темные пространства, создаются новыми путями новые вещества. Люди понемногу овладевают мировой энергией, часто находя к ней доступ с самых неожиданных сторон, раздвигают рамки температур и давлений и побеждают стихии, находя средства к управлению ими.

С каждым годом научные открытия все быстрее и быстрее претворяются в жизнь, пропикая в промышленность и сельское хозяйство. Вместе с тем никогда нельзя предсказать, какие именно области науки получат наиболее полное и быстрое применение. Можно привести десятки примеров, когда изучение явлений, которые, казалось бы, не имеют ни малейшего отношения к актуальным задачам промышленности сегодняшнего дня, приводит к выводам, совершающим переворот в технике. Можно лишь утверждать, что чем лучше, чем полнее удастся ученым разобраться в сущности какого-нибудь явления, тем легче оказывается применить на практике результаты их исследований.

Роль научного исследования для техники сознавалась всегда, но ее начали особенно подчеркивать только в конце XIX столетия, когда правительства государств стали брать в свои руки научное исследование. Пионерами в основании государственных научно-исследовательских институтов явились немецкие ученые, сумевшие доказать государственным деятелям и промышленникам Германии необходимость таких научных учреждений, которые обеспечили бы прогресс промышленности подсобными научными исследованиями. Первым институтом такого рода явился физико-технический имперский институт в Шарлоттенбурге близ Берлина, созданный на средства германской промышленности. Примеру Германии последовали Англия (Национальная физическая

лаборатория) и США (Бюро стандартов в Чевингтон близ Вашингтона), а также другие страны, среди которых на первом месте следует поставить Францию и Японию.

Эти первые научно-исследовательские институты теперь уже отчасти утратили свое выдающееся значение, уступив место огромному числу создающихся за последнее время в большом количестве новых современных институтов, отвечающих новым запросам.

В Советском Союзе научно-исследовательская работа ведется в десятках институтов, из которых несколько главных, основных, ближе стоящих к «чистой» науке, играют руководящую роль для целого ряда других институтов, ближе стоящих к производству, так называемых отраслевых институтов, непосредственно ведущих за собой заводские лаборатории.

Государственный физико-технический институт (ГФТИ) и Оптический институт в Ленинграде, недавно открытые физико-технические институты в Томске и Харькове, Химический институт им. Л. Я. Карпова в Москве — все это основные научные институты первостепенной важности, находящиеся в расцвете своей деятельности и играющие существенную роль в жизни советской науки.

Из отраслевых институтов Союза большую работу ведут: теплотехнические институты (Москва и Ленинград), Всесоюзный электротехнический институт, Институт металлов, Керамический институт и др. Эти институты являются промежуточным звеном между основными институтами и сетью заводских лабораторий.

Физика, которая в дореволюционное время была представлена немногочисленными лабораториями при нескольких университетах, в несколько послереволюционных лет сумела занять одно из первых в мире мест как по разносторонности разрабатываемых вопросов, так и по качеству научного исследования.

В настоящее время, пожалуй, нельзя назвать ни одной области физики, которая бы не разрабатывалась в одном или нескольких научно-исследовательских институтах СССР.

Если бы мы хотели познакомить читателей со всеми работами по физике, ведущимися на территории Союза, нам пришлось бы ограничиться только их перечнем.

Мы поступим иначе и сообразно главнейшим направлениям современной физики опишем основные практические работы, выполненные и выполняемые в лабораториях наших физических научно-исследовательских институтов,

## СТРОЕНИЕ АТОМА И ЕГО ЯДРА

Для человека, мало знакомого с современными методами научного исследования, весь окружающий мир представляется таким, каким его видят глаза, осязают руки и т. д. Попробуйте убедить обывателя, никогда не видавшего микроскопа, в том, что

ничтожная капля воды — это целый мир, в котором живут, размножаются, умирают и ожесточенно борются за свое существование десятки и сотни тысяч живых существ — бактерий, из которых многие играют решающую роль в жизни человечества, являясь причиной заболеваний, иногда, в случае эпидемии, опустошающих целые страны.

Трудно себе представить, во сколько раз человек больше такой ничтожной бактерии. Однако сравнительно недавно биологами был открыт целый мир гораздо более мелких существ, своеобразных простейших бактерий, или фагов, которые вызывают болезни бактерий и играют по отношению к ним ту же роль, какую обычные «крупные» бактерии играют по отношению к людям.

Почти невозможно представить размер этих маленьких паразитов, которые в сотни тысяч раз меньше таких маленьких предметов, как, например, булавочная головка. Самые совершенные микроскопы, увеличивающие в несколько тысяч раз, не позволяют их видеть, и об их существовании можно лишь догадываться на основании косвенных опытов. Это те пределы малости, до которых доходит биология — наука, занимающаяся изучением живых существ.

Физика, изучающая явления окружающего мира главным образом на примере мертвой природы, учит нас, что весь видимый мир состоит из атомов — частиц, размеры которых еще во много тысяч раз меньше, чем размеры мельчайших бактерий — фагов, известных биологии. Хотя никакими самыми точными приборами нельзя увидеть отдельный атом, нередко его удается заметить по тому действию, которое он оказывает на окружающую его среду.

Все, что мы видим перед своими глазами, состоит из отдельных частиц, которые по своим размерам во столько раз меньше булавочной головки, во сколько последняя меньше земного шара.

Отдельные атомы расположены на довольно значительном расстоянии друг от друга. Как именно они располагаются, мы узнаем несколько позже, а пока остановимся еще на внутреннем строении атома, так как он в свою очередь имеет свое, более толкое, строение.

Может быть, на первый взгляд покажется, что такая картина строения вещества представляется слишком сложной; но она в каждой своей детали проверена и подтверждается данными опыта.

Каждый атом — это малейшая частица данного вещества, еще сохраняющая все его свойства. Атом золота — это еще золото со всеми его отличительными свойствами. В природе существует не очень много (92) сортов атомов, из различных комбинаций которых построен весь разнообразный мир окружающих нас предметов.

Ученые довольно долго предполагали, что атом — это простая частица, представляющая как бы «кирпич мироздания». Однако

в течение последних десятилетий было показано, что и атом в свою очередь представляет собой довольно сложное образование, целую систему отрицательно заряженных частиц, вращающихся около положительно заряженного тяжелого ядра. При некоторых обстоятельствах атом может потерять на время один или несколько отрицательных зарядов, вращающихся вокруг его положительного ядра. При этом его свойства меняются, но он может их восстановить, вернув недостающие заряды (атомы электричества, или электроны).

Большинство свойств атома зависит от этих вращающихся вокруг его ядра зарядов, например: цвет вещества, его химические и электрические свойства.

Однако есть особый класс явлений, который стоит несколько особняком от остальных физических явлений. Это — так называемая радиоактивность. Явление радиоактивности заключается в том, что некоторые вещества, встречающиеся в природе в очень малом количестве (десятые доли грамма в тоннах руды), обладают странным свойством: они непрерывно выбрасывают заряженные частицы и испускают лучи, не видимые глазом, но вызывающие почернение фотографических пластинок и обладающие во много раз большей проникающей способностью, чем рентгеновы лучи (широко известные по их применению в медицине). Количество энергии, излучаемое такими веществами, чрезвычайно велико.

Практическое их применение ограничивается пока использованием их лечебных свойств. Однако явление радиоактивности имеет огромное значение для выяснения строения атомов. Известно, что радиоактивность сводится к распаду ядра тяжелых атомов. Изучение этих явлений привело к тому заключению, что ядра всех атомов состоят из ядер простейших газов (водорода и гелия) и атомов отрицательного электричества.

Какие силы сдерживают между собой эти разнородные части ядра, стягивая их в необычайно малую и для большинства элементов очень прочную систему? Что отличает радиоактивные элементы, в которых ядро самопроизвольно распадается с выделением огромного количества энергии, от всех остальных элементов? Каковы запасы «внутриядерной энергии» для тех веществ, которые встречаются в природе более часто, чем архидрагоценный радий и другие радиоактивные элементы?

Над этими вопросами работают многие русские ученые. Достаточно сказать, что в Ленинграде имеется специальный институт, разрабатывающий вопросы, связанные с радиоактивностью. Помимо этого работы по радиоактивности ведутся и в ряде других институтов (Рентгено-радиологический, Физико-технический и т. п.).

Предсказывать практические применения этих работ чрезвычайно трудно, однако можно отметить, что наличие колоссального количества внутриатомной энергии невольно приводит к мысли:

не здесь ли нужно искать выхода из того энергетического кризиса, в который попадет человечество через 2—3 сотни лет, принимая во внимание чудовищный рост промышленности и относительно небольшие природные запасы топлива (лес, уголь, нефть)?

## ОПТИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Оставив в стороне строение атомного мира, о котором, как мы видели, ученым известно очень немного, мы будем сейчас говорить лишь о тех свойствах, которые связаны со строением атома в целом, вернее, с движением вокруг него отрицательных зарядов — электронов, составляющих как бы оболочку вокруг положительного атомного ядра.

Мы уже указывали, что в природе имеется 92 сорта различных атомов. При этом надо иметь в виду, что больше половины из них представляет собой редкие элементы, встречающиеся в природе в ничтожном количестве. Однако в повседневной жизни мы встречаем огромное количество веществ, в десятки и сотни раз превышающее число элементов.

Причина этого заключается в том, что отдельные атомы могут соединяться между собою, образуя молекулу — частицу более сложного вещества, которая по внешнему виду может резко отличаться от составляющих ее элементов. Например, два атома водорода, соединившись с одним атомом кислорода, дают молекулу воды. Таким образом, вода не является элементом, а представляет собой сложное вещество, состоящее из двух элементов. Можно назвать вещества, состоящие из трех, четырех и более элементов.

Вопросом об образовании сложных веществ, соединений из элементов, и, наоборот, о разложении на элементы, равно как и всеми вопросами, связанными с изменением самого вещества, занимается химия. Однако последнее время, когда физикам, с одной стороны, и химикам, с другой, удалось подойти к решению вопроса о том, как именно происходит соединение элементов, когда удалось показать, что химические свойства атомов и молекул связаны с движением вокруг атомного ядра наиболее удаленных от него так называемых внешних электронов, грань между физикой и химией начала стираться. Между ними выросла новая область науки — физическая химия, или химическая физика.

В грубых чертах химическое соединение двух атомов представляется современному ученому в таком виде: атом одного из соединяющихся веществ (представляющий, как мы уже говорили, положительное ядро с вращающимися вокруг него на разных расстояниях отрицательными электронами) потерял при столкновении с другим или под действием света, который распатывает составные части атома, свой наиболее удаленный электрон. На пути его встречается атом другого вещества, к которому «при-



стал» лишний электрон. В этом случае их притягивает друг к другу сила электрического притяжения, и, подчиняясь этому влечению, они подходят друг к другу на достаточно близкое расстояние. Группа электронов начинает вращаться уже вокруг обоих атомных ядер, которые оказываются связанными между собой и продолжают далее совместное существование в виде молекулы нового вещества.

Очевидно, что здесь играет большую роль предварительная обработка атомов (отщепление электрона от одного из них и прилипание лишнего электрона к другому).

Конечно, это лишь самое грубое представление об одном определенном типе химического соединения — реакции, но и оно показывает, что это явление довольно сложно. Вместе с тем вся химическая и многие другие отрасли промышленности строят весь свой рабочий процесс на химических реакциях.

Химическая промышленность зародилась задолго до того, как ученые сумели детально разобраться в явлении химического соединения и распада. На промышленных предприятиях существовали свои традиции и передаваемые из поколения в поколение навыки. Много явлений, весьма важных для управления реакцией, не было понято, не было ясной теории для скорости реакций.

Теперь в научно-исследовательских институтах Союза (Химический институт им. Карпова в Москве, Государственный физико-технический институт) поставлен целый ряд работ, задачей которых является подробное изучение самой сущности химических превращений веществ. Например, в Ленинградском физико-техническом институте изучаются химические взаимодействия между различными газами, причем учитывается влияние всевозможных причин — нагревания, давления газа, посторонних примесей. На основании этих опытов уже удалось составить себе ясное представление о ходе многих химических процессов.

Особое значение имеют опыты по изучению влияния небольших примесей посторонних веществ, которые на первый взгляд никакого участия в химическом превращении не принимают.

Между тем из практики известно, что часто бывает достаточно присутствия ничтожного количества какого-нибудь вещества, для того чтобы в десятки и сотни раз ускорить химическое превращение других продуктов. Это явление носит название катализа.

Совершенно ясно, что, разяснив причины загадочного действия малых примесей, физики смогут найти те вещества, которые оказывают максимальное действие на ускорение химических превращений. Перспективы технического применения этой работы очевидны — ускорение производственных процессов химической промышленности сможет значительно увеличить ее продукцию и, таким образом, окажет помощь делу химизации страны.

В качестве другого примера можно привести изучение устойчивости сильно взрывчатых веществ (нитроглицерин и тротил), которое сможет объяснить причины нередких в настоящее время

самопроизвольных взрывов запасов взрывчатых веществ, которые, сохраняя те же свойства, будут вполне безопасны при хранении и транспортировке.

Отметим, что при изучении химических превращений, особенно в случае процессов в газовой среде, где осуществляются наиболее простые и доступные для наблюдения условия химических превращений, исключительным подспорьем является спектрографическое исследование.

Спектрограф — прибор для изучения свечения различных тел — применяется при исследовании химических превращений. В известных условиях атомы всех тел испускают вполне определенный свет. Цвет этого свечения зависит от движения самых внешних электронов атомов, и поэтому (так как в атомах разных элементов электроны движутся по-разному) спектрограф может служить как для определения состава какого-нибудь вещества (спектральный анализ), так и для выяснения тех перемещений зарядов внутри атомов, которыми сопровождаются химические превращения.

Ряд работ по оптическому изучению свойств атома, поставленный в Государственном оптическом институте (ГОИ) в Ленинграде, позволил сделать чрезвычайно ценные заключения о строении атома, движении электронов внутри его и проч. В области оптического исследования атома работы ГОИ занимают одно из виднейших мест среди работ ученых всего мира.

Химические превращения сопровождаются также изменением электрических свойств газов. При отщеплении электрона от атома или при прилипании его к последнему, атом, бывший раньше нейтральным (заряд отрицательных электронов, вращающихся вокруг ядра, уравновешивается положительным его зарядом), превращается в заряженную частицу и, двигаясь в газе, переносит ток.

Химический анализ, оптический (спектральный) анализ и, наконец, изучение электрических свойств в совокупности дают в руки исследователя совершеннейшее орудие, пользуясь которым советские ученые надеются в ближайшие годы окончательно выяснить характер химических превращений и их внутреннюю сущность.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ И ФИЗИКА «ПУСТОТЫ»

Газ представляет собой отдельные атомы или молекулы вещества, двигающиеся в полнейшем беспорядке, сталкивающиеся между собой и со стенками сосудов, в которых газ заключен. Никакими силами эти отдельные частицы не связаны между собой (в отличие от атомов жидких и твердых тел), и поэтому молекулы газов, разлетаясь во все стороны, стремятся равномерно заполнить тот объем, который этот газ занимает, оказывают очень незначительное сопротивление двигающимся в газе телам и т. д.

Как мы видели, газ представляет собой собрание незаряжен-

ных (электрически нейтральных) частиц. Поэтому при нормальных условиях он не проводит тока. Ток (перенос электричества) может происходить в теле только тогда, когда в нем есть заряженные частицы.

Пользуясь самыми точными приборами, можно, однако, установить, что некоторое, чрезвычайно малое количество заряженных частиц в газе все-таки имеется. Происходит это потому, что в окружающем нас пространстве рассеяны (хотя и в чрезвычайно ничтожных количествах) радиоактивные элементы, которые, как мы видели, испускают быстро движущиеся заряженные частицы. Итак, строго говоря, газы могут проводить электричество благодаря этим заряженным частицам. Правда, количество их настолько мало, что для всех практических целей можно считать газы совершенными изоляторами, непроводниками.

Однако эти малочисленные заряженные частицы дают себя чувствовать, когда в газе создаются сильные электрические поля.

Поместив в газе два металлических шарика и заряжая их с помощью хотя бы электрической машины — один электричеством положительного, а другой отрицательного знака, мы получим между ними электрическое поле. В результате на всякую заряженную частицу, попавшую в пространство между шарами, будет действовать электрическая сила. Положительно заряженная частица газа начнет двигаться к отрицательно заряженному шару и наоборот. Внутри газа начнется движение электричества, т. е. через газ пойдет электрический ток. Чем больший заряд мы дадим нашим шарикам, тем сильнее будет электрическое поле, следовательно, и ток в газе будет все время возрастать.

Заряженные частицы, или, как их называют, ионы (по-гречески ион значит путник), при своем движении сквозь газ сталкиваются с атомами газа с тем большей силой, чем сильнее электрическое поле. Начиная с некоторой определенной силы электрического поля картина резко меняется. В газе появляется свечение (которым, как мы видели, сопровождаются всякие перестройки атомов), ток через газ сильно возрастает, а иногда даже проскакивает искра, причем в этот момент через газ идет уже очень значительный ток. Газ перестает быть изолятором.

Эти бурные явления объясняются очень просто. Увеличивая силу электрического поля, мы все ускоряем и ускоряем полет заряженных частиц через газ. Начиная с некоторой определенной скорости, эти частицы (ионы) при столкновении с атомами газа разбивают их, отрывая один из внешних электронов, благодаря чему после каждого столкновения вместо одной заряженной частицы оказываются две. Эти новые ионы в свою очередь ускоряются электрическим полем и через мгновение, столкнувшись с атомами газа, разбивают и их. После каждого столкновения число заряженных частиц в газе удваивается.

Движение заряженных частиц в газе напоминает в этом случае лавину, которая, двигаясь, необъятно растет. Ведь достаточно

всего десяти столкновений, чтобы число ионов в газе (а следовательно, и ток через него) возросло в тысячу раз. Это явление, которое носит название газового разряда, происходит при атмосферном давлении и довольно значительных электрических полях. Например, для того чтобы произошел разряд между шарами, расположенными на расстоянии всего в 1 мм, нужно приложить напряжение около 3000 в.

Разрежая газ (это мы можем сделать, выкачивая его из замкнутого сосуда с помощью воздушного насоса), мы уменьшаем количество частиц газа, заключенных в данном объеме, и облегчаем движение заряженных частиц под действием электрического поля, так как они претерпевают меньшее количество столкновений на своем пути. Благодаря этому газовый разряд при пониженном давлении начинается при меньших напряжениях. Можно подобрать такое давление газа, при котором разряд будет начинаться при напряжении в 200 или даже 100 в.

За последние годы очень большое количество ученых как за границей, так и у нас, в Союзе, занялось изучением электрических свойств разреженных газов. Описанные выше свойства газового разряда, а также испускание электричества раскаленными телами позволили в течение нескольких лет создать целую обширную отрасль промышленности — производство электрических пустотных приборов, или электровакуумную технику («вакуум» — по-латыни пустота).

В частности, изучение в Ленинградском государственном физико-техническом институте газового разряда при пониженном давлении привело к разработке конструкции защитных приспособлений для линий слабого тока. Этот вопрос получил актуальнейшее значение в связи со строительством силовых электростанций и развитием электропередач высокого напряжения.

Нередки случаи, когда линии передачи высокого напряжения проходят неподалеку от линий слабого тока (телеграфа, телефона, железнодорожной сигнализации). При работе линии высокого напряжения, а в особенности при включении и выключении ее, в сети слабого тока появляются наведенные (индуктированные) электрические заряды, которые не только могут мешать работе телеграфа, но и угрожают целостности приборов и жизни обслуживающего персонала.

Достаточно, например, указать, что при выключении линии передачи Волховской гидроэлектрической станции провода линии железнодорожного телеграфа Мурманской железной дороги могли бы зарядиться до 7000 в, если бы линия не была снабжена защитными предохранителями. В таком положении находятся Штеровская станция, Московско-Казанская железная дорога и многие другие.

Конструкция газовых предохранителей, которыми оборудованы все линии слабого тока, проходящие неподалеку от высоковольтных линий передач, в основном следующая.

В сосуд, заполненный газом при пониженном давлении, впаиваются две металлические гильзы-электроды, между которыми происходит разряд. Состав и давление газа, а также материал электродов подобраны таким образом, чтобы разряд происходил при напряжении около 50 в.

Один из электродов такого разрядника присоединяется к защищаемой сети, другой отводится к земле. При нормальной работе линии напряжение между сетью и землей не превышает 50 в, причем разрядник практически не проводит тока. Как только в сети появляются заряды, вызванные внезапным нарастанием напряжения в линии электропередачи, и напряжение сети возрастает выше 100 в, в предохранителе происходит разряд, и весь опасный заряд отводится к земле. После этого разряд в предохранителе мгновенно прекращается, и линия опять готова к работе.

Помимо предохранителей, существуют еще многочисленные применения газового разряда при пониженном давлении. Особо отметим основанные на этом явлении приспособления для превращения переменного тока в постоянный — выпрямители с тлеющим разрядом, ртутные выпрямители, которые с каждым годом завоевывают себе применение, вытесняя дорогие стоящие мотор-генераторные преобразователи. Почти целиком на такого рода выпрямители перешли радиовещательные станции.

Вопросами применения газового разряда при пониженном давлении занимаются в целом ряде лабораторий, в частности в заводских лабораториях Москвы и Ленинграда. Однако большинство работ концентрируется в Центральной радиолaborатории (Ленинград).

В настоящее время физики располагают весьма разнообразными приборами, позволяющими производить разрежение газов (откачку). Из приборов, имевших применение только в лабораториях главным образом для демонстрации любопытных свойств разреженных газов, разрежающие насосы стали не только одним из основных орудий лабораторной работы, но и основой целых отраслей промышленности. Лучшие из воздушных насосов позволяют производить разрежение газов в миллиарды раз (давление остатков газа при этом не превышает нескольких стомиллионных миллиметра).

Количество атомов в столь разреженном газе настолько мало, что ионы в нем могут двигаться, вовсе не сталкиваясь на своем пути, благодаря чему в чрезвычайно сильно разреженных газах (в вакууме) разряд не происходит даже при очень больших электрических полях.

Целый ряд имеющих громадное практическое применение пустотных приборов основан на том, что металлы при достаточном нагревании начинают испускать отрицательные электрические заряды (электроны). Помещая в вакууме два электрода, из которых один нагрет до такой степени, что испускает отрицательное элек-

тричество, мы получаем прибор, который может пропускать ток только в одном направлении, т. е. выпрямитель. Такого рода выпрямители (кенотроны) особенно выгодны для выпрямления переменного тока очень высокого напряжения.

Это же явление лежит в основе действия катодных ламп, применяемых в радиоприемниках. Можно сказать, что те колоссальные темпы, которыми в последние годы развивается радиосвязь, и в основном радиовещание, стали возможными только благодаря усовершенствованию катодных ламп. Это славное дело было выполнено в СССР разными лабораториями и в особенности Нижегородской радиолaborаторией, которая в настоящее время почти целиком перешла в состав Центральной радиолaborатории (Ленинград).

Сейчас ряд советских ученых занят вопросом о том, каким образом облегчить выход электронов из раскаленного металла. Было замечено, что для разных металлов выход электронов начинается при различных температурах. Все радиолюбители, вероятно, ощущали досадное чувство, вызванное необходимостью пользоваться тяжелыми, громоздкими и хлопотливыми в обращении батареями аккумуляторов накала. Вероятно, большинство из них помнит появление так называемых микроламп с нитью, покрытой торием, которые требовали в 10 раз меньшего тока накала.

Нужно надеяться, что дружные усилия ученых, направленные на изыскание способов облегчения отрывания электронов из раскаленных тел, приведут в скором времени к тому, что необходимый для накала ламп ток окажется еще в десятки раз меньшим, благодаря чему батареи накала, которые до сих пор были самой тяжелой и громоздкой частью радиоприемника, будут сокращены в своих размерах и стоимости.

Промышленные и коммерческие перспективы этого усовершенствования особенно велики в связи с тем, что радиоприемная аппаратура имеет чрезвычайно широкое распространение.

## СТРОЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА И РЕНТГЕНОВЫ ЛУЧИ

Из нашего беглого очерка видно, что электрические свойства газов находят себе широкое техническое применение. Однако в промышленности имеют преимущественное применение тела в твердом состоянии.

Изучение всевозможных свойств твердых тел — их строения, электрических, магнитных, механических и других свойств — имеет поэтому исключительное значение для техники.

Мощным орудием для изучения твердого тела оказались рентгеновы лучи, открытые в 1895 г. Эти лучи представляют собою такие же электромагнитные колебания, как радиоволны или свет, но отличаются от тех и других длиной волны (частотой) своих колебаний.

Мы видели, что разные изменения в движении внешних электронов атома сопровождаются испусканием света. Если атом подвергается более сильным воздействиям (например, удару очень быстро несущегося электрона), то в нем могут произойти более радикальные перестройки, могут быть вырваны внутренние, более тесно связанные с ядром электроны, и эти-то изменения в атоме и сопровождаются испусканием рентгеновых лучей. Чем большие количества энергии выделяются в атоме при перегруппировке составляющих его зарядов, тем более короткой длины получаются волны и испускаются лучи.

При перегруппировках самых внешних электронов испускаются видимые лучи (свет), при перегруппировках ближе расположенных к ядру (внутренних) электронов — лучи Рентгена и наконец при разрушении самого ядра — радиоактивное излучение, или так пазываемые гамма-лучи, которые обладают самой короткой длиной волны.

Проникающая способность и малая длина волны рентгеновых лучей делают особенно ценными их научные и технические применения. Проникающей способностью рентгеновых лучей широко пользуются в медицине для просвечивания тела человека в целях обнаружения внутренних повреждений и инородных тел, а также и для лечения внутренних органов. В последнее время рентгеновская техника шагнула далеко вперед, благодаря чему оказалось возможным применить рентгеновское просвечивание и для испытания технических материалов.

Рентгеновская трубка состоит из стеклянного или металлического баллона с сильно разреженным газом; в баллон впаяны металлические электроды. Между ними прикладывается очень значительное напряжение (от 20 000 до 200 000 в), ускоряющее двигающиеся между электродами заряженные частицы, которые при ударе об электрод вызывают появление рентгеновых лучей.

Между трубкой и фотографической пластинкой помещается исследуемая деталь. После проявления на пластинке появляется изображение исследованного предмета, причем все внутренние дефекты: пустоты (раковины) и т. п. могут быть легко замечены благодаря тому, что почернение пластинки будет более значительным, поскольку в этих местах рентгеновым лучам приходится проходить меньшую толщю металла.

Такой метод исследования готовых изделий был разработан в Ленинградском государственном физико-техническом институте и в настоящее время получает широкое применение в заводских лабораториях металлообрабатывающей промышленности.

Достаточно указать, что с помощью этого метода можно обнаружить в готовом маховом колесе (толщиной 8 см) раковины, размер которых составляет около 2 мм.

Однако еще более ценным свойством рентгеновых лучей, которое превратило рентгеновский анализ в один из основных спо-

собов изучения твердого тела, является малая длина волны этих лучей.

Наблюдая за водой возле причальных тумб или стоящих в воде свай, на которых построена пристань, мы видим, что крупные волны, не отражаясь, проходят через ряд свай, тогда как мелкая рябь, отражаясь от каждого столба, дает причудливые картины переплетающихся волн и отраженную рябь, распространяющуюся в обратную сторону.

Точно так же звуковые волны, отражаясь (вызывая эхо) от крупных препятствий (длинные высокие здания, резкая граница леса и т. п.), огибают, не отражаясь, небольшие препятствия, такие как отдельные деревья, столбы и т. п. Вообще отражение происходит лишь от таких предметов, которые по своим размерам превышают длину волны колебания.

Видимый свет имеет длину волны от 4 до 80 тысячных миллиметра. Размеры отдельных атомов и молекул еще в сотни и тысячи раз меньше, благодаря чему видимый свет не отражается от отдельных молекул, и мы бы никогда не могли их увидеть, если бы не рентгеновы лучи, которые обладают меньшей длиной волны, чем размеры отдельных атомов.

Пропустив рентгеновы лучи через кристалл, физик Лауэ заметил, что пучок рентгеновых лучей разделяется кристаллом на целый ряд пучков, как будто внутри кристалла имеется ряд зеркал, расположенных под разными углами к пути луча. Это исключительно по своей важности наблюдение послужило основой для развития обширнейшей области знания и пролило свет на внутреннее строение твердого тела.

Изучение твердых тел с помощью рентгеновых лучей показало, что кристаллы построены из атомов или ионов (заряженных атомов), расположенных в пространстве с необыкновенной правильностью.

Отдельные частицы, притянутые друг к другу силами взаимодействия их электрических зарядов, образуют то, что называется пространственной решеткой. Например, кристаллы поваренной соли можно себе представить как целый ряд плоскостей, по которым в шахматном порядке расположены ионы натрия и хлора. Другие кристаллы обладают более сложным строением, по все части одного и того же кристалла построены совершенно тождественно.

Частицы составляющих кристалл элементов расположены в строгой последовательности и на вполне определенных расстояниях. Благодаря такой правильности строения кристаллов трудно, зная заряды отдельных ионов, вычислить целый ряд свойств кристалла, например его механическую прочность, т. е. ту силу, которая требуется для разрыва кристалла, и т. д.

Итак, кристаллическое состояние вещества характеризуется правильностью своего строения. Но какое значение для техники может иметь изучение свойств кристаллов? Ведь в повседневной жизни мы, казалось бы, почти не встречаемся с кристаллами и



смотрим на них лишь как на курьезное явление природы. Однако изучение строения технических материалов показало, что кристаллическое состояние имеет гораздо больше значения, чем это кажется на первый взгляд.

Правда, в природе и в технике редко приходится иметь дело с большими кристаллами, но зато почти все технические материалы — железо, сталь, цветные металлы и т. д. — представляют собой не что иное, как совокупность, сращение бесчисленного количества мелких кристаллов, размером не более малых долей миллиметра, каждый из которых представляет собой настоящий кристалл, построенный из миллионов атомов или ионов с такой же правильностью, как и большие кристаллы.

Размер, взаимное расположение, а также внутреннее строение отдельных кристалликов могут быть изучены с помощью рентгеновых лучей. Мало того, рентгеновский анализ позволяет выяснить сущность явлений, происходящих в материале при горячей или холодной его обработке (при отжиге, закалке, наклепе). Все виды обработки сводятся к изменению строения, размеров и взаимного расположения отдельных кристаллических зерен, из которых состоит технический материал.

Изучение вопросов строения технических материалов и значения их обработки было начато еще более десяти лет тому назад в Ленинградском государственном физико-техническом институте и привлекло чрезвычайное внимание всей металлообрабатывающей промышленности.

Рентгеновское исследование структурных изменений металлов при их обработке, поставленное в настоящее время на ряде крупных металлических заводов (Мариупольском, Кальчугинском), привело к упрощению и рационализации технологических процессов и к крупной экономии.

Особый интерес представляют ведущиеся сейчас в Ленинградском государственном физико-техническом институте работы по разработке новой формы рентгеновского изучения материала. Ведь до сих пор получение рентгенограммы материала, по которой можно судить о его строении, требовало значительного времени; поэтому нельзя было пользоваться рентгеновскими методами для изучения явлений, довольно быстро меняющих строение вещества. Нельзя было, например, производить рентгеновские наблюдения над изменениями, происходящими в материале во время его отжига или закалки, и приходилось ограничиваться снятием рентгенограмм до и после соответствующей операции.

Сейчас путем громадного повышения мощности рентгеновских трубок пытаются сократить необходимый для получения рентгенограмм срок до возможного предела, что приведет к созданию своего рода рентгеновского кино, т. е. приспособления для записи быстро текущих процессов. Это имело бы колоссальное значение для изучения и рационализации процессов горячей обработки металлов.

Помимо изучения структурных изменений при обработке материалов, нужно указать еще на то значение, которое рентгеновский анализ имеет для изучения сплавов, следовательно, для более рационального подбора составляющих их веществ. Эта задача очень важна благодаря тому, что современная техника все шире пользуется сплавами часто из очень большого количества отдельных металлов.

Московский рентгеновский институт с успехом решил ряд прикладных вопросов, связанных с производством рентгеновской аппаратуры, спрос на которую значительно возрос в связи с расширением сети рентгеновских лабораторий на металлообрабатывающих заводах. Эта аппаратура теперь производится в Советском Союзе, что в значительной мере освобождает от необходимости приобретать дорогое и сложное оборудование за границей. Этим достигается значительная экономия валюты.

### МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ И НОВЫЕ СПОСОБЫ ИХ ИСПЫТАНИЙ

Механические свойства материалов представляют собой чрезвычайно важную область физического исследования, так как при расчете конструирования каких бы то ни было сооружений, начиная от часовой пружины и кончая железнодорожным мостом, нужно знать упругие свойства и прочность применяемых в конструкции материалов.

Советские ученые вкладывают немало труда в усовершенствование методов механических испытаний. Как пример можно привести разработанные в Ленинградском государственном физико-техническом институте радиоэкстенсометр и струнный прибор для испытания строительных сооружений.

Первый из них служит для измерения чрезвычайно малых изменений длины коротких испытываемых образцов при небольших нагрузках.

Струнный прибор, конструкция которого очень проста, применяется для изучения деформаций готовых сооружений. При исследовании в разных точках сооружения прикрепляются колки, между которыми натягиваются струны. В начале опыта все струны настраиваются в один тон, после чего исследуемое сооружение нагружается. Благодаря сжатию или растяжению его отдельных частей, расстояние между колками, а следовательно, и натяжение струн меняется. Заставляя звучать эти струны после нагрузки и подстраивая к их изменившемуся тону тон струны, укрепленной между колками на деке специального приборчика, конструкция которого позволяет измерять расстояние между его колками, определяют деформацию отдельных частей сооружений.

Этот способ получил широкое применение в строительной технике. С его помощью удалось решить целый ряд практических

задач: измерить натяжение в различных частях железобетонных мостов при проходе поездов, давление зыбучего грунта на канализационные железобетонные трубы, натяжение в стержнях габионов (клеток из толстой проволоки, заполняемых камнями и укладываемых в качестве основы при подводных строительных работах).

Помимо разработки методов механического исследования — задачи, технически очень важной, но не дающей ответа на вопрос о причинах прочности и упругих свойств материалов, — советские физики были заняты изучением механических свойств кристаллов.

Однокристалльные образцы при исследовании всевозможных свойств материалов имеют неоспоримые преимущества перед обычно применяемыми в технике мелкокристаллическими материалами. Однокристаллы построены наиболее правильно, и благодаря этому происходящие в них явления отличаются большой простотой и закономерностью — в них легче разобраться, легче их предвидеть, рассчитать и истолковать.

Изучив свойства кристалла железа, легче перейти к техническому железу, представляющему собрание микроскопических кристалликов.

Для изучения кристаллов нужно прежде всего их получить, а это далеко не всегда простая задача. В СССР многие физики, металлурги и минералоги работали над получением крупных кристаллов и в результате этих работ научились получать крупные кристаллы целого ряда металлов и других материалов.

Преимущества изучения свойств материалов на кристаллах были своевременно оценены и за границей, и там ученые трудились над проблемой выращивания крупных кристаллов. Таким образом, достижения советских ученых в области получения кристаллов представляют немаловажный вклад в мировую науку.

Мы уже говорили, что благодаря правильности строения кристаллов их физические свойства могут быть определены, если известны расстояния между отдельными атомами или ионами кристалла, а также свойства отдельных атомов. Чем проще строение кристалла, тем легче вычислить характеризующие его параметры.

Одним из самых простых кристаллов является кристалл каменной соли. Зная заряд ионов хлора и натрия, из которых он состоит, и определив их взаимное расположение с помощью рентгеновых лучей, удалось подсчитать ту силу, которую нужно приложить к кристаллу, для того чтобы разорвать его, т. е. вычислить прочность кристалла. Она оказалась равной 200 кГ для кристалла с поперечным сечением в  $1 \text{ мм}^2$ . Этот результат являлся вначале неприятной неожиданностью для физиков, занимавшихся вопросом прочности твердых тел, так как опыты по разрыву каменной соли в обычных условиях дают значение прочности всего в 0.5 кГ на  $1 \text{ мм}^2$ .

Работами ученых в Ленинградском государственном физико-техническом институте было полностью выяснено это несоответствие между теоретической и практической прочностью кристаллов. Причины его можно пояснить следующим примером. Возьмем за кощцы аккуратно вырезанную полоску плотной бумаги. Попытаемся разорвать ее. Для разрыва нужно приложить довольно значительную силу. После этого у края такой же полоски сделаем маленький надрыв. Теперь для ее разрыва необходима во много раз меньшая сила.

Оказывается, что малые показатели прочности кристаллов объясняются мельчайшими, даже незаметными для невооруженного глаза, трещинами на его поверхности. Погружая кристалл соли в воду, которая, растворяя поверхность, не дает образовываться трещинкам, можно наблюдать многократное увеличение его прочности. Удалось, соблюдая эту меру предосторожности, получить кристаллы, выдерживавшие нагрузки до  $160 \text{ кг}$  на  $1 \text{ мм}^2$ , т. е. наблюдать упрочнение кристалла более чем в 300 раз.

Особенно интересным был опыт, когда кристаллу соли придавалась форма цилиндрика, у которого в середине делалась выточка, так что сечение средней части цилиндра было в 20 раз меньше, чем сечение крайних частей, захваченных прибором, применявшимся для растяжения.

В воду погружалась только средняя выточенная часть малого сечения, тогда как толстые части кристалла около захвата оставались сухими. Разрыв происходил всегда в сухой части, несмотря на то что ее сечение было в несколько десятков раз больше, чем сечение средней части кристалла. Полученные значения прочности, превышающие  $150 \text{ кг}$  на  $1 \text{ мм}^2$ , лежат очень близко к теоретически вычисленной прочности. Этим подтверждается правильность наших представлений о кристаллическом состоянии вещества.

То обстоятельство, что повседневно наблюдаемая техническая прочность материала представляется весьма ничтожной по сравнению с той прочностью, которой обладает материал, находящийся в надлежащих условиях, невольно наводит на мысль о том, что в технических конструкциях материал используется нерационально.

Разумеется, от лабораторных опытов, которые позволили наблюдать трехсоткратное увеличение прочности кристаллов, до применения на практике этого явления еще очень далеко. Потребуются годы, а может быть, и десятилетия напряженной совместной работы ученых и техников, для того чтобы на основе этих фактов рационализировать использование технических материалов, но сама возможность многократного механического упрочнения материалов сулит — пусть даже в далеком будущем — совершенно новые пути для техники. Увеличение прочности материалов в несколько раз влечет за собой облегчение во столько же раз

всякой технической конструкции. Само собой понятно, что это значит для любой отрасли техники.

Помимо изучения механической прочности кристаллов, советские ученые занимались вопросом о природе пластической деформации кристаллов. Эти работы велись как в Ленинградском государственном физико-техническом институте, так и в соответствующей лаборатории Томского университета.

Под влиянием растягивающей силы кристалл удлиняется, причем до некоторого предельного значения растягивающей силы его деформация (удлинение) является обратимой, т. е. при разгрузке кристалл принимает первоначальные размеры. Такое растяжение носит название упругой деформации.

Начиная, однако, с некоторого предела нагрузки, кристалл перестает возвращаться к своим первоначальным размерам; после разгрузки он остается несколько удлиненным. Такого рода удлинение носит название пластической деформации. Она имеет большое значение для механических свойств, так как кристалл, подвергнутый предварительно пластической деформации, оказывается более прочным при испытании на разрыв, нежели свежий, недеформированный кристалл.

Для изучения этого явления были применены самые разнообразные методы: механические (измерение удлинения при разгрузке), оптические, рентгеновские. В результате обнаружилось весьма интересное явление. Под действием значительной нагрузки кристалл удлиняется не постепенно, не течет, как думали ученые прежнего времени, а внезапно, через довольно регулярные промежутки времени. Деформация кристалла идет скачками: одна часть кристалла при этом как бы сползает с другой. В месте такого скольжения кристаллическая решетка уже разрушена. По мере растяжения весь кристалл оказывается испещренным подобными следами скольжения.

Все эти явления, которые еще и до сих пор нельзя признать достаточно разъясненными, очень близко соприкасаются с вопросами холодной обработки технических материалов (наклепа), загадочного явления «усталости» и т. п.

Ряд новых фактов, обнаруженных советскими физиками, позволяет надеяться, что скоро и эта важнейшая область перестанет быть темной страницей как для ученых, так и для инженеров-производственников. Вся современная технология металлов, применяемая в металлообрабатывающей промышленности, основана на этих явлениях и очень часто представляет собой собрание рецептов, испробованных практикой, смысл которых еще далеко не понятен.

Не зная самой сущности явления, никогда нельзя сказать, является ли данная операция действительно необходимой, нельзя рассчитывать существенно реорганизовать производственный процесс. Потому-то этот цикл работ имеет актуальное значение даже для промышленного сегодняшнего дня.

В связи с поставленным перед современной техникой требованием передачи электрической энергии на большие расстояния, что связано с расширением и строительством крупных электростанций, расположенных вдали от мест потребления энергии, — приходится переходить к передачам все более и более высокого напряжения. При этом особенную важность приобретает вопрос об изоляции, так как стоимость изоляции составляет главный расход при постройке высоковольтных станций и линий передач.

До последних лет физическая природа процессов, происходящих в изоляторах (непроводниках), была совершенно неясной, и широко поставленное научное исследование электрических свойств твердых изоляторов является исключительной заслугой советских ученых. Можно смело сказать, что в этой области наши научные исследования опередили заграничные, и авторитет наших ученых этой специальности признается повсеместно.

Наиболее темным местом в свойствах твердых изоляторов было явление пробоя, которое, напоминая по характеру явление газового разряда, описанное нами выше, заключается в том, что, приложив к образцу изолятора некоторое напряжение и постепенно его увеличивая, мы вначале наблюдаем лишь небольшое увеличение текущего в изоляторе тока, и то лишь в том случае, если в нашем распоряжении имеются очень тонкие приборы, так как ток через изоляторы при нормальных условиях очень мал. Внезапно при некотором напряжении через изолятор проскакивает искра, ток чудовищно увеличивается — изолятор теряет свои свойства. При этом можно видеть, что между электродами образовался канал, представляющий непоправимое разрушение.

Во избежание пробоя изоляции в условиях ее практической работы, который приводит к выключению целой линии передачи, а в случае пробоя изоляции кабеля — и к очень длительным ремонтным работам, во всех электротехнических сооружениях приходится прибегать к очень значительному запасу прочности, что делает изоляционные устройства весьма дорогими и громоздкими.

Для того чтобы разобраться в явлении пробоя, было начато исследование электрических свойств твердых изоляторов и в первую очередь изолирующих кристаллов.

Предварительно нужно было решить, каким образом изоляторы вообще проводят ток, какие заряженные частицы в них могут двигаться и т. д. В решении вопроса об электрических свойствах твердых изоляторов приняла участие большая группа советских ученых. Работы в этой области велись преимущественно в Ленинграде (Государственный физико-технический институт), частично в Томске (лаборатория университета) и в Москве (Всесоюзный электротехнический институт).

Определяя электрические свойства кристаллов, мы можем так же, как и для механических свойств, рассчитать, вычислить

ожидаемые свойства. В самом деле, рассмотрим кристалл каменной соли.

Он состоит из ионов (заряженных атомов) хлора и натрия. Они расположены в правильном порядке и удерживаются силами взаимного притяжения их электрических зарядов. Что же произойдет, если к нашему кристаллу приложить электрическое напряжение, т. е. создать в нем электрическое поле? Положительные ионы (натрий) начнут притягиваться к отрицательному электроду, отрицательные (хлор) — к положительному; при некоторой величине поля сила притяжения между электродами и ионами превысит силу взаимного притяжения ионов, и кристалл будет разрушен электрическим полем.

Электрическое поле, при котором произойдет это разрушение, является теоретическим пределом электрической прочности; для кристалла, например, каменной соли толщиной в 1 см оно соответствует напряжению около 100 млн в. Вместе с тем пробой, т. е. электрическое разрушение кристаллов, наступает обычно гораздо раньше, при электрических полях, в 100—200 раз меньших.

Для того чтобы понять, в чем причина явления пробоя, которая, как видно из этого подсчета, не является разрывом кристалла под действием электрических сил, нужно немного подробнее остановиться на явлении прохождения тока через твердые изоляторы.

Отдельные ионы, из которых состоит непроводящий кристалл, все время совершают беспорядочные колебания. Только при очень низких температурах кристалл действительно представляет ту исключительно правильную систему из чередующихся положительно и отрицательно заряженных атомов, которую мы описывали выше. С повышением температуры ионы начинают раскачиваться на своих местах — и тем сильнее, чем выше температура. При этом некоторым ионам удастся качнуться настолько сильно, что они срываются со своего места и получают возможность двигаться внутри кристалла. Чем выше температура, тем больше ионов срывается со своих мест, тем сильнее кристалл отличается от той идеально правильной системы, которую мы себе представляли.

Наконец, при определенной температуре в кристалле возникает такой беспорядок, что электрическое притяжение между отдельными ионами оказывается не в силах поддержать утраченный порядок, весь кристалл расшатывается, расплывается — это явление соответствует плавлению кристалла, превращению его в жидкость.

При комнатной температуре большинство кристаллов представляет собой почти безусловно правильную систему. Только ничтожно малое количество ионов вырывается со своих мест под влиянием раскачивания, которое носит название теплового движения.

Само собой разумеется, что когда к кристаллу прикладывается напряжение, т. е. в нем создается электрическое поле, эти оторвавшиеся ионы начинают двигаться в кристалле, т. е. возникает ток.

Из сказанного выше становится ясно, что с понижением температуры кристалла ток, проходящий через него, будет уменьшаться, а при повышении ее — увеличиваться. В этом явлении и лежит причина пробоя для некоторых изолирующих материалов.

Представим себе пластинку из какого-нибудь изолирующего вещества, помещенную между металлическими электродами, к которым приложена разность потенциалов. Через изолятор пойдет ток. Прохождение тока (как бы мал он ни был) всегда вызывает некоторое нагревание. Внешние части изолирующей пластинки будут нагреваться меньше, так как им легче отдавать выделяющееся тепло окружающему пространству. Больше всего нагреется часть пластинки, расположенная между самыми средними частями электродов.

Это нагревание, как мы видели, вызовет отрывание новых ионов внутри изолятора, что в свою очередь приведет к увеличению тока через среднюю часть изолятора и к ее дальнейшему нагреванию. Весь вопрос в том, достаточно ли будет отдаваться тепла нагретым местом образца окружающему пространству и электродам. При достаточно большом напряжении, приложенном к образцу, температура его средней части будет быстро повышаться, ток через нее — быстро увеличиваться, что довольно скоро приведет к образованию в изоляторе проводящего канала, т. е. к пробоям.

Это явление теплового пробоя наблюдается во всех непроводниках при повышенной температуре. В некоторых материалах происходит пробой и при комнатной температуре, однако число таких изоляторов сравнительно невелико. В большинстве изолирующих материалов число ионов, освобожденных тепловым движением, настолько мало, что вызванное их движением нагревание никак не может привести к сколько-нибудь опасным для изолятора последствиям. Пришлось искать каких-то новых явлений для объяснения пробоя изоляторов, и они были найдены ленинградскими учеными.

Оказалось, что в большинстве изоляторов явление пробоя очень напоминает газовый разряд: заряженные частицы разгоняются электрическим полем. При определенном поле их скорость делается настолько значительной, что при столкновении с ионами, закрепленными в кристалле, они выбивают последние с их положений. Каждый из двигавшихся в кристалле ионов после столкновения вырывает новый, так что вместо одной заряженной частицы оказывается 2, при следующем столкновении их делается уже 4, потом 8 и т. д. Легко убедиться, что при достаточном количестве столкновений число ионов, а следовательно, и ток через изолятор будут чудовищно расти. Попятно,



что выделившегося при движении этой ионной лавины тепла будет достаточно, чтобы расплавить, разрушить, «пробить» кристалл.

Казалось бы, что из этого безотрадного положения нет выхода. Какой бы совершенный изолятор ни взять, как бы мало в нем ни было начальное число подвижных ионов, все равно при определенном напряжении поля возникает неумолимая ионная лавина, которая приведет к разрушению изолятора.

Однако и здесь удалось найти остроумный выход из положения. Представим себе листок изолятора, толщина которого настолько мала, что при движении от одного электрода до другого ион испытывает всего пять столкновений. Что же произойдет, если напряжение, приложенное к такому образцу, будет достаточно для того, чтобы подвижные ионы стали вырывать при столкновениях ионы, закрепленные на своих местах? Каждый ион на своем пути от одного электрода до другого претерпит пять столкновений, и, таким образом, число ионов, движущихся в изоляторе, т. е. ток через него, возрастет всего в  $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$ , т. е. в 32 раза. Словом, для тонкого листка изолятора ионная лавина не сможет достигнуть сколько-нибудь опасной величины.

Чем меньше толщина изолятора, тем ближе его электрическая прочность к пределу прочности, вычисленному как электрическая сила, необходимая для разрыва кристалла. Для очень тонких слоев изолятора, например для листочков слюды толщиной в несколько десятитысячных миллиметра, наблюдаемая электрическая прочность соответствует вычисленной.

Из этих данных можно сделать немаловажное практическое заключение: собрав ряд очень тонких изолирующих слоев с прослойками из вещества, не пропускающего ионы (например, из проводника), мы получим технический изолятор, для которого не страшна ионная лавина и прочность которого, следовательно, во много раз выше прочности обычных, сплошных, изоляторов и стремится к чудовищно высокой цифре — к 100 млн в на 1 см.

Разумеется, практическое осуществление изоляции такого типа встречает большие трудности. Оно требует разработки совершенно новых технологических приемов, неизвестных ранее электротехнической промышленности. В самом деле, получение совершенно однородных слоев толщиной в тысячные доли миллиметра является далеко не легкой задачей. Вместе с тем технический интерес проблемы огромен.

Отметим, что здесь идет речь о создании нового типа изоляции, прочность которой в несколько десятков раз выше, чем у наилучших из применяемых сейчас типов. Нет необходимости говорить о тех возможностях, которые открылись бы после разработки технического типа изоляции в деле высоковольтного магнито-, трансформаторо- и аппаратостроения.

Что же касается перспектив в кабельном деле, то здесь достаточно сослаться на мнение одного авторитетного немецкого

специалиста, который заявил: «В Германии в настоящее время около 500 тыс. км воздушных линий высокого напряжения. В ближайшие 5 лет их протяженность возрастет до 4 млн км. Если бы удалось электрические свойства кабельной изоляции улучшить всего на 30%, то все эти линии мы упрятали бы под землю, что представляет неисчислимые преимущества в эксплуатационном отношении».

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Размеры этой статьи не позволяют подробно остановиться на целом ряде отделов физики, которые настолько расширились, что, оставаясь тесно связанными с основными физическими предпосылками, выросли в самостоятельные отрасли знания. Нередко эти отрасли имеют чрезвычайно большое практическое значение. Достаточно отметить электротехнику, радиотехнику, наконец, теплотехнику и многие другие области, выросшие из физики и переросшие рамки отделов физики. Ведь этими тремя областями знания обслуживается значительная часть современной промышленности.

Несколько особняком стоит чрезвычайно интересный отдел физики — биофизика, стоящая на границе между физикой и биологией. Эта область знания изучает физические явления, происходящие в живых организмах. В Советском Союзе этими вопросами занимается крупный Московский научно-исследовательский институт биофизики.

Если мы и касаемся вопроса об электромагнитных волнах, которые изучает по преимуществу радиотехника, то лишь потому, что в некоторых областях электрические колебания имеют исключительное значение для выяснения принципиальных физических вопросов.

Герц, около пятидесяти лет тому назад обнаруживший распространение в пространстве электрических колебаний, впервые указал на их электромагнитную природу и установил основные законы их распространения. Волны Герца имели длину в несколько десятков метров. Позже было доказано, что свет, воспринимаемый нашим глазом, представляет не что иное, как электромагнитные колебания, отличающиеся от герцевских волн лишь длиной волны, которая для световых волн составляет около 0.0005 мм.

С тех пор усилиями ученых всего мира были изучены электромагнитные колебания волн самой разнообразной длины. Электромагнитные колебания с длиной волны от нескольких километров до нескольких десятков метров применяются в радиотелеграфии.

Получение их сводится к возбуждению электрических колебаний в системе проводов, расположенных над поверхностью земли (антенны), от которых электромагнитные волны распро-

страняются во все стороны и могут быть восприняты в приемных устройствах. Самые длинные волны применяются сейчас главным образом на крупных радиостанциях для целей государственной радиосвязи.

Для получения этих колебаний применяются высокочастотные электрические машины, а кое-где, преимущественно у нас в Союзе, мощные генераторные радиолампы. В смысле конструирования и практического использования мощных радиоламп наша страна стоит на одном из первых мест благодаря выдающимся работам Нижегородской радиолaborатории, а также — Центральной радиолaborатории в Ленинграде.

Передача на длинных волнах отличается большой устойчивостью, но требует применения мощных и громоздких отправительных устройств. За последние годы внимание ученых всего мира привлекает область более коротких волн (ниже 200 м), поскольку при благоприятных атмосферных условиях они дают возможность палатить связь между чрезвычайно отдаленными точками на земной поверхности, пользуясь совершенно ничтожной мощностью.

Нет сомнений, что этой области электромагнитных колебаний суждено сыграть немаловажную роль в развитии радиосвязи, особенно в военных условиях, так как, помимо значительно менее громоздкого оборудования отправительных станций, передача короткими волнами дает большие преимущества благодаря тому, что удается добиться направленности сигналов, т. е. передачи не во все стороны, а в одном направлении.

Над изучением коротких волн работает очень большое количество советских ученых, на этой области вообще сконцентрировано внимание почти всех радиотехников нашей страны. В Ленинграде Физико-технический институт и Центральная радиолaborатория, в Москве Всесоюзный электротехнический институт и Государственный университет, в Харькове Украинский физико-технический институт ведут работы над исследованием еще более коротких волн — до нескольких сантиметров длиной. В области волн длиной около 1 м советские ученые ищут решения вопроса о передаче энергии без проводов, при этих условиях стремятся получить точно направленный пучок радиоволн.

Электромагнитные волны длиной от нескольких десятков метров до нескольких сантиметров представляют собой чрезвычайно удобное орудие для исследования внутреннего строения твердых, а главное — жидких изоляторов. Системы электрических зарядов (молекулы или группы молекул внутри изолятора) могут колебаться с вполне определенной частотой, которая зависит от внутреннего строения вещества. Помещая такое вещество в быстропеременное электрическое поле (колебания с длиной волны в несколько сантиметров), мы можем измерить частоту, с которой колеблются системы зарядов внутри изолятора, а это дает нам ответ на многие вопросы, связанные с его строением.

Подобного рода исследования ведутся как в московских, так и в ленинградских радиолaborаториях.

Пойти дальше в изучении коротких волн было весьма заманчиво, так как, с одной стороны, колебания зарядов в кристаллических диэлектриках лежат в области волн ниже 1 мм, с другой стороны, электромагнитные колебания с длиной волны в 0.1 мм, принадлежат уже к инфракрасным волнам, т. е. к колебаниям, испускаемым нагретыми телами, за счет которых происходит передача тепла. Несколько лет упорной работы ленинградских и московских физиков, которые шли совершенно различными путями, привели к тому, что и эта область электромагнитных колебаний была изучена.

С помощью этих так называемых ультракоротких волн были получены очень ценные сведения о строении кристаллов.

За этой переходной областью следует область тепловых (инфракрасных) колебаний с длиной волны от 0.1 мм до 0.0008 мм. Далее идет видимая область электромагнитных колебаний, т. е. свет, воспринимаемый нашим глазом, причем свет различного цвета имеет разную длину волны. Расположение цветов в порядке убывания длины волны следующее: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. За фиолетовой частью видимой области электромагнитных колебаний следует так называемая ультрафиолетовая область. Эти лучи, не действуя на глаз, действуют на фотографическую пластинку. Свет испускается атомами при изменении движения внешних электронов вокруг ядра.

Детальное изучение состава света, излучаемого атомами, позволяет в мельчайших подробностях установить как строение атома, так и те изменения в его строении, которые сопровождаются излучением света. Эта кропотливая и подчас чрезвычайно трудная работа была с успехом проведена в Ленинградском государственном оптическом институте. Так же, как и между кратчайшими радиоколесаниями и областью тепловых лучей, между ультрафиолетовыми и рентгеновыми лучами существовала неизученная область колебаний.

И здесь честь освоения этого прежде не исследованного участка спектра принадлежит советским ученым. Наблюдения над рентгеновыми лучами от легких элементов, выполненные также в Ленинградском физическом институте, позволяют считать и эту область электромагнитных колебаний полностью изученной.

Далее следуют рентгеновы лучи, длина волны которых уменьшается по мере перехода к все более и более тяжелым элементам. Нам уже пришлось по другому поводу коснуться работ ученых СССР в области рентгеновых лучей. Переходя к еще более коротким волнам, мы встречаем гамма-лучи радия, излучение которых сопровождается разрушением атомного ядра тяжелых элементов. Несколько лет тому назад на этом можно было бы и закончить перечень электромагнитных колебаний, по теперь к ним еще

нужно добавить загадочные колебания, которые к нам, по-видимому, доходят из-за пределов земной атмосферы — из звездного пространства.

Изучением этих колебаний, которые названы проникающим излучением, занимается сейчас ряд сотрудников Ленинградского государственного радиового института Академии наук. Надо надеяться, что скоро мы сможем больше сказать о причинах и источниках этого загадочного излучения.

Окинув беглым взглядом необъятную область электромагнитных колебаний, длина волн которых, начиная от длиннейших радиоволн и до проникающего излучения, меняется в число раз, изображаемое единицей с 18 нулями, мы видим на каждом ее участке вклад советских ученых, решающих проблемы научного и прикладного использования этих колебаний. Сотни ученых, крупнейшие институты мирового значения — вот предпосылки для успешного развития советской физики наших дней, все достижения которой направлены в сторону еще большего увеличения возможностей нашего социалистического строительства.

Статья, написанная совместно с проф. А. К. Вальтером, была опубликована в виде отдельной брошюры под названием: Над чем работают советские физики. М., «Московский рабочий», 1930.

Высказанные в статье оценки сохранили свое значение. Следует, однако, отметить, что дальнейшие исследования (в частности, А. Ф. Иоффе и его ученика А. П. Александрова) показали, что работы по тонкослойной изоляции содержали ошибки и сама идея использования тонких слоев для высоковольтной изоляции не может быть реализована. Обнаруженное в процессе проведения этих работ повышение значения пробивного напряжения изоляторов оказалось связанным с более совершенной структурой прослоек из изоляторов (в сравнении с техническими «массивными» изоляторами). Указанные работы имели и другие полезные выходы.

## СОВЕТСКИЕ ФИЗИКИ И ДОРЕВОЛЮЦИОННАЯ ФИЗИКА В РОССИИ

В самом начале XX в. в физике произошли резкие изменения. Эпоха, охватывающая период 1895—1912 гг., характеризуется установлением принципиальных основ атомной физики. Была доказана атомная структура электричества, определены заряд и масса электрона, установлено атомное строение вещества, измерено число атомов в данном теле и число заключенных в каждом атоме электронов, расположение атомов в кристалле. Броуновское движение сообщило статистическому представлению о тепловом движении молекул такую же реальность, какой обладали прежде только непосредственно наблюдаемые макроскопические явления.

Настойчивые попытки дать теорию лучистой энергии привели Планка к необходимости ввести новую универсальную постоянную — квант действия. Выяснилось, что в природе света, кроме давно известных волновых свойств, имеется другая, квантовая

сторона. Решающей в этом направлении была работа Эйнштейна, который показал, что основные факты в области фотоэффекта и флюоресценции свидетельствуют о квантовой структуре самих электромагнитных волн, а не только явлений испускания и поглощения света. Наконец, теория относительности Эйнштейна составила одно из важнейших направлений физики этой эпохи.

Основой физики предвоенных лет были две задачи — узнать строение атома и понять физический смысл квантов. Каждый новый факт, связанный с атомной физикой, использовался, чтобы построить новую гипотезу атома. Одну из таких гипотез — планетчатый атом — предложил в это время О. Д. Хвольсон. Но только с 1912 г., когда появилась идея Резерфорда об электронах, вращающихся вокруг положительного ядра, и вслед за тем ее дальнейшее развитие в квантовой модели Бора, эта задача нашла свое решение. В том же 1912 г. открытие интерференции рентгеновых лучей в кристаллах обнаружило атомную структуру кристаллов и положило начало спектроскопии рентгеновых лучей. В работах Мозлея эти спектры связались со строением атома.

Строение атомов и кристаллов, рентгеновые и оптические спектры атомов и загадка сверхпроводимости — вот чем жила физика в период перед первой мировой войной.

Что было у нас в это время?

В 1906 г., когда я начинал работать в Петербурге, в физике были еще сильны традиции XIX в., скорее, его середины — школы Ф. Ф. Петрушевского. Преподавание физики в высшей школе шло по линии так называемой измерительной физики — методов измерения, как основы точного знания.

Во всех высших школах С.-Петербурга первый курс отводился описанию измерительных приборов, и только со второго курса излагались законы из области теплоты, электричества, магнетизма, оптики, акустики. Теоретическая, или, вернее, математическая, физика в университете сводилась к феноменологической формулировке законов и решению уравнений в частных производных из области теплопроводности и электростатики.

Профессора и преподаватели физики высших школ обладали обширной эрудицией, но мало внимания уделяли творческой деятельности. Научные работы оставленных при университете часто сводились к повторению опубликованных работ.

Блестящие, но также по преимуществу феноменологические лекции О. Д. Хвольсона пользовались успехом у студентов, но не давали импульса к научному творчеству. Таков был и его замечательный многотомный курс физики, полно и дидактически ясно охвативший всю совокупность физических знаний того времени и переведенный на ряд иностранных языков.

Научная работа в Физическом институте Петербургского университета находилась на невысоком уровне. Ее состояние можно иллюстрировать напутствием, которое после смерти основного ру-

ководителя Физического института И. И. Боргмана было сделано мне и Д. С. Рождественскому, как его преемникам по руководству научными работами: «Конечно, Дж. Дж. Томсон или Резерфорд создают новые пути в науке, но не может же обыкновенный наш физик придумывать какие-то новые проблемы, а поэтому задача Физического института — довыпытать знания и экспериментальное искусство сотрудников».

Однако в эти же годы в Петербурге вел свою работу Д. С. Рождественский, который создал «метод крюков» и закончил уже свое замечательное исследование дисперсии в парах натрия.

Другим блестящим физиком того времени в Петербурге был Д. А. Рожанский, диссертация которого (исследование искры) привлекла всеобщее внимание свежестью физических идей.

Столь же ярким явлением была диссертация В. Ф. Миткевича о механизме вольтовой дуги, наглядно показывающая роль электронов. В области оптики вызвали интерес работы С. И. Покровского по интерференции и А. Л. Гершуна — по оплотехнике.

Недостаточно оценены интересные исследования Н. А. Гезеуса и Н. Н. Георгиевского по электризации трением.

Дальше позвольте назвать себя: возвратившись в Петербург из Мюнхена, где я работал с Рентгеном, я поставил своей целью экспериментальное доказательство существования электронов и квантов света, очевидность которых мне стала ясна с самого начала. Наряду с этим я продолжал начатые в Мюнхене исследования электрических свойств кристаллов.

Большое влияние на всех петербургских физиков, в частности на меня, имел Павел Сигизмундович Эренфест. Его необычайная творческая и общественная активность подняла научные интересы и научную критику на большую высоту.

Нельзя забывать, что в том же Петербургском университете кафедра химии являлась мощным центром физической и химической мысли, возглавляемым великим Менделеевым.

Одним из важнейших тормозов для физиков того времени была университетская система сдачи магистерских экзаменов, необходимых для получения доступа к научной работе в университете. Это уродливая система была камнем преткновения, который в течение многих лет в Петербурге не преодолел ни один физик. Преподаватели-математики не делали различия между учеными с математическими интересами и физиками, для которых математика являлась вспомогательным методом в работе, а не содержанием их деятельности.

Такова была физика столичного С.-Петербурга.

По другому обстояло дело в Москве. Здесь зародилась первая русская школа физиков, школа Петра Николаевича Лебедева, из которой вышел ряд ведущих ученых. Школа Лебедева по тематике и научной организации представляла собой самое отрадное явление дореволюционной физики. Она не могла, однако, развернуться в условиях царской России. Я хорошо помню 1907—

1909 г., когда мне приходилось бывать у Лебедева в Москве. Его научные лаборатории помещались в подвале Физического института, потому что основные этажи предназначались для других целей. Однако и из подвала ему пришлось уйти, когда Московский университет, протестуя против увольнения прогрессивной профессуры, вступил в конфликт с реакционным царским правительством. Значительная часть профессоров ушла из университета; вместе с ними ушел и Лебедев. Хотя он и пытался организовать лабораторию в небольшой частной квартире, настоящего большого института из нее в то время вырасти не могло; до окончанья же постройки нового института он не дождался.

К Лебедеву примыкали: его товарища, блестящий физик и педагог Александр Александрович Эйхенвальд — автор классического исследования магнитного поля движущегося заряда и токов смещения, сильно способствовавший подъему научного уровня московских физиков, и ближайший ученик Лебедева — Петр Петрович Лазарев, организовавший научную работу в области биофизики и геофизики.

В лаборатории Лебедева проводился ряд интересных физических исследований. Прежде всего это были замечательные работы самого Лебедева по световому давлению на твердые тела и газы, работы П. П. Лазарева и А. К. Тимирязева по кинетической теории газов, акустические измерения В. Д. Зернова и др., работы в области радиоволн В. К. Аркадьева и В. И. Романова. Из этой же школы вышли С. И. Вавилов, Б. В. Ильин и многие другие. В Москве работали еще Н. А. Умов и А. П. Соколов.

В провинции работали отдельные крупные ученые, среди них такие, как Д. А. Гольдгаммер и В. А. Ульянин в Казани, Д. А. Рожанский и Т. П. Кравец в Харькове, в Одессе Н. П. Кастериц, в Киеве И. И. Косоногов и П. Н. Шиллер.

И в Петербурге, помимо университета, имелись отдельные крупные физики: Н. А. Гезехус, Д. Ф. Егоров, А. Л. Гершун, В. Ф. Миткевич, братья Д. А. и Н. А. Смирновы, но школ они не создали. В Академии наук работал один из основоположников сейсмографии Б. Б. Голицын, а затем и А. Н. Крылов.

Русская физика может назвать ряд выдающихся имен: Ломоносова, Петрова, Ленца, Стелетова, Менделеева, и такие технические достижения, как вольтова дуга Петрова, гальванопластика Якоби, свеча Яблочкова, лампа накаливания Лодыгина и радиосигнализация Попова.

Перед Октябрьской революцией мы имели немало образованных физиков, но единственной большой научной школой была школа Петра Николаевича Лебедева, к тому времени умершего. Его заменил П. П. Лазарев. Только перед самой революцией в Петрограде выделилась наша группа, в которую входили П. Л. Капица, Я. И. Френкель, Н. Н. Семенов, П. И. Лукирский, Я. Г. Дорфман и несколько других. Из этой школы потом вырос Физико-технический институт.



В этот период существовало физическое общество, среди членов которого, помимо научных дискуссий, нередко возникали острые политические конфликты. В Петербургском физическом обществе числилось немногим больше 100 членов и столько же в Московском, причем значительная часть членов состояла одновременно в двух обществах сразу. Кроме того, среди членов общества имелись любители физических знаний, не занимавшиеся научной работой. Я думаю, что число ученых физиков в России того времени правильно будет оценить примерно в 100 человек.

У нас был журнал Физико-химического общества, состоявший из двух частей: физической и химической. В физической части было два раздела — оригинальные работы и обзоры, но все это в очень небольших масштабах — 9 тощих номеров в год.

Подготовка кадров в Петербургском университете определялась программой государственных экзаменов, которая была составлена чиновниками, занявшими место прогрессивных московских профессоров. Мне приходилось участвовать в государственных экзаменах в Петербургском университете и на Высших женских курсах. Я часто задавал вопрос: «Почему стрелка амперметра отклоняется при прохождении тока?». Большей частью вопрос вызывал недоумение, а иногда ответ был такой: «Электрическая стрелка, потому и отклоняется». В университетском преподавании физика и техника не связывались, а даже противопоставлялись друг другу.

Великая Октябрьская революция круто повернула судьбы русской физики. Уже в 1918 г. начала организовываться советская физика, причем совсем другими путями, чем шла физика дореволюционная. Советская власть создала крупные научные центры, которых почти не было до революции, поскольку физическая лаборатория Академии наук, руководимая Б. Б. Голицыным, занималась вопросами сейсмологии, а физическая лаборатория была невелика.

На протяжении только 1918 г. было образовано три больших института. В Москве создан Институт физики и биофизики. Этот институт, предназначавшийся для П. Н. Лебедева и возглавляемый П. П. Лазаревым, получил сильный уклон в биологию, но занимался также молекулярной физикой, оптикой, геофизикой и другими разделами физики. В Ленинграде в октябре 1918 г. был организован Физико-технический институт и вскоре там же — Оптический институт, который вырос затем в самый большой в мире институт, являющийся научной базой оптической промышленности Советского Союза.

Каждый из этих трех институтов ставил себе целью как развитие самой физики, так и связь ее с соответствующими отраслями жизни. Институт физики и биофизики, естественно, тяготел к медицине, Физико-технический — к электротехнике, энер-

гетике, металлам, Оптический институт поставил и решил задачу создания в Советском Союзе промышленности оптического стекла и оптических приборов. Кроме того, каждый институт создал большую школу, в которой начали расти кадры нового типа.

В первые годы существования Советской власти Советский Союз был отрезан от заграницы, и наша научная работа велась в отрыве от мировой науки. Основные направления и научные интересы, как потом выяснилось, были те же, что и за границей. Новой была их связь с задачами построения первого в мире социалистического общества.

Война застала физику в период бурного расцвета атома Бора и метода Лауэ. С этих позиций мы и начали развивать свою работу.

Д. С. Рождественский организовал атомную комиссию. В ее задачу входило дальнейшее развитие теории Бора и обобщение ее на случай более сложных по сравнению с водородом атомов и их спектров. Для всестороннего использования метода Лауэ Физико-техническим институтом была организована молекулярная комиссия. В основе работ первой лежал атом Бора, второй — метод Лауэ.

В атомной комиссии зародилась передовая магнитная теория спектральных двойников Рождественского. Молекулярная комиссия привела к открытию механизма пластических деформаций и текстур при холодной обработке металлов.

В начале 1921 г. мне и Д. С. Рождественскому было предложено восстановить научные связи с заграницей. С этой целью, а также для закупки оборудования мы были командированы за границу. С нами вместе выехали А. Н. Крылов и П. Л. Капица. Встретили нас чрезвычайно благожелательно, а доклад о результатах работ советских ученых за этот период вызвал сенсацию. Никто не ожидал, что в «дикой стране большевиков» может развиваться наука и давать результаты, в некоторых случаях идущие дальше того, что достигнуто в западных странах. В первые же годы советская физика заняла достойное место в мировой науке.

Наша поездка имела целью также обеспечить новые институты оборудованием, потому что в те годы ждать его от наших заводов было бесполезно. И эта вторая задача была выполнена мной и Д. С. Рождественским. Наши институты получили прекрасное оборудование, причем в таком большом количестве, что когда из Физико-технического института выделилась целая серия институтов, многие из них продолжали пользоваться частью этого оборудования.

После нашего возвращения институты укрепились. 4 февраля 1923 г. наш институт переехал из Политехнического института в собственное специально оборудованное здание, и примерно в то же время начал перемещаться из университета Оптический институт.

Оглядываясь на весь этот период, я считаю большой заслугой советских физиков, что вместо случайной тематики, иногда перенесенной из-за границы, они стали развивать свои собственные научные направления. Многие из поставленных у нас проблем заинтересовали заграничные лаборатории и в некоторых случаях получили там значительное развитие; но важно отметить, что наша тематика строилась на том фундаменте, который был заложен в самом начале советского периода, в условиях полной изоляции от западной науки.

Начну с близкого мне Физико-технического института. Здесь получила широкое развитие проблема прочности и пластической деформации кристаллов и их электрических свойств. Эти вопросы начали усиленно изучаться и на Западе — в Англии, Германии и США. Некоторые из наших выводов стали предметом оживленной дискуссии; не все они полностью сохранили свое значение, но все же ведущая роль принадлежала нам. Здесь же Иваном Васильевичем Обреимовым был разработан остроумный метод получения монокристаллов. В то время многие заграничные лаборатории, перейдя к изучению монокристаллов, использовали метод Обреимова, а иногда и его кристаллы. Большое значение имели также работы Обреимова по силам сцепления в слюде и позже по новому виду двойникования, образующегося при пластической деформации.

К этому времени относится также появление ряда других направлений, имеющих свои корни в советской физике и распространившихся на лаборатории всего мира.

Николай Николаевич Семенов уже в студенческие годы стремился сочетать физику с химией. Начав с исследования электрических полей методом раскаленного зонда, он использовал эти данные для улучшения методики измерения энергии ионизации и диссоциации. Создав теорию так называемого теплового пробоя диэлектриков, он перенес основные идеи этой теории на химические явления и пришел к теории цепных реакций, которые открыли новый этап химической кинетики и дали целый ряд важнейших практических результатов.

Петр Иванович Лукирский положил начало важному направлению в области электроники и фотоэффекта. Создав метод шарового конденсатора, он впервые определил распределение скоростей электронов в металле. Петр Иванович в течение долгого времени был также научным консультантом лаборатории нашего основного в этой области завода «Светлана».

Александр Алексеевич Лебедев в Оптическом институте своими тщательными исследованиями процессов отжига стекла в значительной степени способствовал созданию промышленности оптического стекла, разделяя эту честь с И. В. Гребенчиковым и Н. Н. Качаловым.

Из новых направлений в области молекулярной физики большое значение получили рентгеновские текстуры вещества, харак-

теризующие изменения кристаллической решетки при деформациях и холодной обработке. В 1918 г. мной совместно с М. В. Кирпичевой были опубликованы первые рентгенограммы деформированных кристаллов,

В Москве этим вопросом занимался Н. Е. Успенский, бывший также сотрудником Физико-технического института, а в Ленинграде — Н. Я. Селяков и Г. В. Курдюмов. Часто забывают, что основное представление о рентгенограммах как о результате отражения рентгеновских лучей от атомных плоскостей в кристаллической решетке было выдвинуто замечательным, к сожалению рано погибшим, русским физиком-кристаллографом Юрием Викторовичем Вульфом, причем раньше и, конечно, независимо от Брэгга. В то время Ю. В. Вульф был также сотрудником Физико-технического института.

Д. В. Скобельцын, поместив камеру Вильсона в магнитное поле, смог измерять скорости электронов. Этим методом он изучил спектры гамма-лучей и открыл быстрые электроны космических лучей.

Выдающимся представителем советской науки первого периода был безвременно скончавшийся профессор физико-механического факультета Александр Александрович Фридман, автор теории относительности с отрицательной кривизной, получившей столь важное значение. А. А. Фридман создал передовую школу динамической метеорологии, из которой вышли Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Б. И. Извеков и др.

К этому же времени относится и поток новых идей, которые внес в физику Я. И. Френкель. Из них особенно замечательны идея о перемещении свободных мест, о вязкости жидкостей, о движении зарядов в твердых телах, о поверхностном натяжении металлов и о квантовых электронных состояниях электронов проводимости в металлах. Особенно большое значение получило представление Френкеля о переносе тока и диффузии путем перемещения пустых мест в сплошь заполненной среде. Эта идея была распространена Френкелем на перемещение внутри кристалла возбужденных состояний (получивших название экситонов) атомных электронов.

Новую струю в изучение фотоэффекта внес И. Е. Тамм, установивший, что внешний фотоэффект имеет двойное происхождение — поверхностное и объемное. Он же показал, в чем заключается основная сила, удерживающая электроны в металле. Всеобщее признание получили работы Л. Д. Ландау по диамагнитным и парамагнитным свойствам электронов в металле.

Большое значение имел переход Физического института Академии наук, руководимого С. И. Вавиловым, в Москву. Здесь к нему присоединилась научная школа Леонида Исааковича Мандельштама. Как для самого Мандельштама, так и для его школы (Г. С. Ландсберг, С. Э. Хайкин, А. А. Андронов, М. А. Леонтович) характерно сочетание глубокой теории с блестящими экспе-

риментами. Она значительно углубила наши знания в области молекулярной физики изучением тонкого механизма вязкости, трения и дисперсии звука.

Всем советским физикам хорошо известно, что именно Манделштаму и Ландсбергу принадлежит честь первого наблюдения и правильного объяснения комбинационного рассеяния света, которое называется эффектом Рамана. Тот же Манделштам вместе с нераздельно связанным с ним Николаем Дмитриевичем Папалекси положили начало теории нелинейных колебаний и ее разнообразным применениям. Другой вид комбинационного рассеяния открыл и изучил позже Е. Ф. Гросс.

В. К. Аркадьев с сотрудниками изучали магнитные свойства железа при больших частотах. Хотя объяснение магнитных спектров и не могло быть полностью сохранено, но работы эти дали немало ценных результатов, в том числе феноменологическую теорию магнитных свойств ферромагнетиков. А. А. Глаголева-Аркадьева и М. А. Левитская были пионерами в деле получения электромагнитных волн, перекрывающих инфракрасный спектр. В «массовом излучателе» Глаголева-Аркадьева нашла оригинальный и остроумный путь решения труднейшей технической задачи.

В Оптическом институте под руководством Дмитрия Сергеевича Рождественского выросла сильная школа спектроскопистов: С. Э. Фриш, В. М. Чулановский, В. К. Прокофьев, Е. Ф. Гросс и др.

Идея Рождественского о магнитном происхождении дублетов оказала большое влияние на развитие теории спектров. Его метод крюков широко использовался при изучении дисперсии. Из его школы вышел А. Н. Теренин, положивший начало новому подходу к изучению механизма химических реакций и свечения газов. Под влиянием Д. С. Рождественского получила развитие оплотехника, светотехника, промышленность оптического стекла и оптических приборов. К сожалению, значение научной и организационной деятельности Рождественского одно время недооценивали.

В Институте физики и биофизики Петр Петрович Лазарев создал физико-химическую теорию передачи нервного возбуждения, установил законы адаптации зрения и слуха. Им же было проведено исследование Курской магнитной аномалии.

К этому же времени относится и начало работ в области технической физики, которая впервые развернулась при Советской власти. Наряду с успешной деятельностью Оптического института, в Физико-техническом институте покойным академиком А. А. Чернышевым была создана лаборатория электрофизики, Н. Н. Андреевым — лаборатория акустики, М. В. Кирпичевым — лаборатория теплотехники, где был разработан метод моделирования тепловых установок. Здесь же развилась школа Н. Н. Давиденкова по механическим свойствам металлов.

Первое десятилетие (с 1919 по 1928 гг.) развития советской физики создало, таким образом, целый ряд новых научных направлений, выделило большие школы, которые сделали советскую физику полноправным членом мировой науки, связали ее с прогрессом советской техники и включили в бурный расцвет социалистической культуры. С этого времени начали расти новые физико-технические институты в Томске, Харькове, Днепропетровске, Свердловске, Горьком.

Следующий период лучше известен, поэтому я ограничусь только кратким перечислением вновь созданных научных течений.

Изучение аморфных тел, их механических и электрических свойств, связей между теми и другими, физическое исследование полимеров и их специфических особенностей были развиты П. П. Кобеко и А. П. Александровым.

По ферромагнетизму и по влиянию анизотропии на явление ферромагнетизма проводились работы Н. С. Акулова и Е. И. Кондорского в Московском государственном университете; в вопросы теории магнетизма новые черты внесли работы Я. Г. Дорфмана, И. К. Кикоина и С. В. Вонсовского, работающих в Свердловске. Сотрудники Н. С. Акулова в Москве, Р. Н. Янус и П. А. Халилеев в Свердловске разработали новые методы магнитной дефектоскопии.

Исследования по нелинейным колебаниям Манделъштама и Папалекси создали новую область учения о колебаниях и привели к конструкции электрических машин параметрического резонанса. Новыми методами развили теорию нелинейных колебаний Н. М. Крылов и Н. Н. Боголюбов.

Люминесценция жидкостей — область, целиком созданная С. И. Вавиловым, В. Л. Левшиным и их сотрудниками. Им принадлежит также установление законов затухания фосфоров и их использование в важных практических целях.

В последние годы вместе с рядом сотрудников Физико-технического института я занимался полупроводниками, их физической природой и практическим использованием, надеясь этим путем разрешить общую проблему электрических свойств твердых тел. В эту область удалось внести значительную ясность. В этом же направлении работали киевская (А. Г. Гольдман) и одесская (Е. А. Кириллов) школы физиков. И. К. Кикоин и М. М. Носков открыли новый фотомагнитный эффект в полупроводниках. В работах Д. И. Блохинцева, В. П. Жузе, Б. И. Давыдова, А. В. Иоффе и С. И. Пекара была выяснена природа выпрямительных свойств пограничных слоев. В десятки раз улучшены выпрямители, фото- и термоэлементы и созданы новые их типы. Впервые изучены полупроводниковые сплавы металлов и жидкие электронные полупроводники.

Неожиданное открытие в классической области электромагнитной теории света сделал П. А. Черенков в лаборатории

С. И. Вавилова и под его руководством. Черенков обнаружил направленное излучение быстрых вторичных электронов, выбиваемых гамма-лучами и движущихся в веществе со скоростями, превышающими фазовую скорость света. Теория этого явления, данная Франком и Таммом, полностью объяснила все детали наблюдаемых явлений и была также подтверждена прямыми опытами с быстрыми электронами, проведенными в США.

Большим событием в советской физике было открытие Петром Леонидовичем Капицей явления сверхтекучести гелия-II (так называемого сверхпроводимости), приведшее в дальнейшем к открытию Ландау и Пешковым второго звука в том же гелии-II.

Помимо большого принципиального значения этого нового яркого проявления квантовых законов, обнаруженного Капицей, его исследования открывают путь для дальнейшего приближения к абсолютному нулю температур. Турбодетандер и вертушечная разгонка газов Капицы создали новую технику низких температур. Немаловажное значение имеет также выяснение Л. Д. Ландау и А. И. Шальниковым природы промежуточного состояния между сверхпроводимостью и нормальной проводимостью. В Харькове интересные результаты дала криогенная лаборатория под руководством Б. Г. Лазарева.

Обширная школа по изучению механических свойств твердых тел создана за годы Советской власти В. Д. Кузнецовым в Томске. Опубликованная ими пятитомная монография охватывает как советские, так и зарубежные работы в этой области. Особенно крупные успехи достигнуты, помимо Кузнецова, его сотрудниками М. А. Большапиной и В. М. Кудрявцевой.

Видное место занимают советские работы по рентгенограммам и фазовым превращениям в металлах, возглавляемые Г. В. Курдюмовым и С. Т. Копобеевским. Большое значение получили исследования школы Н. Н. Давиденкова (Ф. Ф. Витман, Я. А. Фридман, М. В. Якутович, Е. М. Шевандин) по ударной прочности, работы А. В. Степанова — по пластичности, А. П. Комара — по диффузии, М. О. Корнфельда — по твердости жидкостей. С. А. Векшинский предложил и осуществил новый метод получения сплавов непрерывно изменяющегося состава возгонкой металлов в вакууме из разных центров.

Другая ведущая советская школа охватывает учение об электрической изоляции. Работы П. П. Кобеко, Б. М. Вула и их сотрудников положили начало новым научным течениям и привели к созданию новых технических материалов: эскапона, полистирола, титаната бария.

И. В. Курчатov вместе с П. П. Кобеко и Б. В. Курчатovым открыли новое физическое явление, представляющее собою электрическую аналогию ферромагнетизма и названное ими сегнетоэлектричеством. Дальнейшим развитием этого открытия являются исследования Б. М. Вула, связанные с титанатом бария.

В область электронных явлений большие сдвиги внесли работы В. Е. Лашкарева, Л. А. Арцимовича и Л. А. Кубецкого, впервые создавшего фотоэлектрическую трубку с многократным усилением благодаря вторичной эмиссии. Новые типы фотоэлементов с запорным слоем разработали Б. Т. Коломиец, М. П. Гельман. Новые методы математической физики в области электрических явлений и электронной оптики созданы Г. А. Гринбергом.

В области акустики выросла школа Н. Н. Андреева, к которой принадлежат Б. П. Константинов, А. А. Харкевич, А. И. Белов и А. В. Римский-Корсаков, сильно развившие акустику музыкальных инструментов, Д. И. Блохинцев разработал теорию акустики движущейся среды.

Крупнейший в мире Оптический институт после смерти Д. С. Рождественского развивался под руководством С. И. Вавилова и занял ведущее место по разрешению ряда оптических задач. С. И. Вавилов создал новый метод наблюдения и измерения предельно слабого света и с его помощью наглядно показал существование фотонов. Здесь Е. М. Брумбергом был осуществлен отражательный ультрафиолетовый микроскоп; А. А. Гершуном разработана теория светового поля, проведены исследования Т. П. Кравца и М. А. Севостьяновой по фотографическому процессу, созданы новые астрономические приборы Д. Д. Максудовым, широко развернута А. И. Тудоровским работа по расчету оптических систем, разработаны остроумные интерференционные приборы В. П. Линника, А. А. Лебедевым создан электронный микроскоп. Во время Отечественной войны Оптический институт обеспечивал Советскую Армию отечественной оптикой.

В Институте химической физики под руководством Н. Н. Семенова и его сотрудников Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона получило новое обоснование учение о взрывах и горении.

Л. Д. Ландау дал общую термодинамическую теорию фазовых переходов.

Проблемой атомного ядра мы начали заниматься несколько поздно, но все же имели ряд серьезных успехов — в работах И. В. Курчатова по ядерной изомерии, в исследованиях А. И. Алиханова, который, составив метод магнитной спектроскопии со счетчиками совпадений, измерил ряд спектров и установил свойства бета-распада радиоактивных ядер, в работах Л. А. Арцимовича, А. И. Лейпунского, К. Д. Синельникова и др. по рассеянию быстрых электронов, И. М. Франка и Н. А. Добротина — по нейтронам. Г. Н. Флеров и К. А. Петржак открыли самопроизвольный распад ядер урана. Новые данные большого принципиального значения получены также при изучении космических лучей Д. В. Скобельцыным и В. И. Векслером на Памире, А. И. Алиханьяном и А. И. Алихановым на Алагезе. Явление взрыва атомных ядер под влиянием космических лучей было открыто Г. С. Ждановым методом толстослойных фотографических пластинок, разработанных впервые Л. В. Мысовским в Радиовом ин-



ституте. В. И. Векслеру принадлежит идея синхротрона, открывающая новые пути получения частиц сверхвысоких энергий.

Основные линии квантовой механики созданы не у нас; однако метод, разработанный В. А. Фоком, стал ведущим для проблемы атомных электронов. Современное представление о протонах и нейтронах как единственных элементах атомного ядра принадлежит Д. Д. Иваненко. Большое значение для развития наших представлений о ядерных силах имели идеи И. Е. Тамма.

Представления о тепловом движении элементов ядра и перетяжке ядер урана были высказаны впервые Я. И. Френкелем. Количественная теория космических ливней дана Л. Д. Ландау.

Особенно велики успехи советских физиков в областях науки, граничащих с физикой. Кроме кинетики химических реакций, которая является одним из самых блестящих выходов физики за ее пределы, у нас перекинут и другой мост — от физики к химии. А. Н. Теренин и В. Н. Кондратьев на основе спектрального анализа разрешили ряд важных химических задач. Участие физиков (А. П. Александрова, П. П. Кобеко, С. Е. Бреслера, С. Н. Журкова) в изучении высокомолекулярных соединений открыло новые пути в этой области и оказало влияние на английскую и американскую научную мысль.

По вопросам прочности технических материалов Н. Н. Давиденков с сотрудниками, развивая мои представления о температуре перехода из хрупкого в пластичное состояние, дали новые методы оценки ударной прочности сталей.

А. П. Александров и С. Н. Журков создали статистическую теорию хрупкой прочности, а А. В. Степанов — теорию пластического разрушения кристаллов. М. В. Классен-Неклюдова изучила новое явление скачкообразной деформации. Идея о поверхностных трещинах как источнике разрушения и о влиянии адсорбции поверхностно-активных веществ была широко использована П. А. Ребиндером, который создал усовершенствованные методы бурения нефтяных скважин, лучшие методы обработки металлов, замену охлаждающих жидкостей водными растворами и т. д.

Кристаллография в руках А. В. Шубникова дала новые замечательные результаты в области строения и выращивания кристаллов и теории симметрии. Здесь получены новые пьезоэлектрики, анизотропные материалы повышенной прочности, искусственные рубины и т. п.

Нельзя не упомянуть новых направлений в агрофизике, стремящихся использовать физику для сельского хозяйства. Эта задача была поставлена коллективизацией сельского хозяйства, в условиях которой появилась возможность в больших масштабах воздействовать на физические условия урожая.

Вопросы теплового баланса, структуры, влажности и теплопроводности почв, влияния светового режима на жизнь растений, в частности роли отдельных участков спектра на различных ста-

дях роста, — все это задачи, требующие для своего разрешения современных методов физического исследования. Физико-агрономическому институту удалось добиться некоторых успехов в таких важных практических проблемах, как борьба с засухой и заморозками, укрепление и озеленение песчаных пустынь, осушение почвы, а также решить целый ряд задач, стоящих на границе физики с сельским хозяйством. Институт разработал большую серию измерительных приборов для агротехнических работ.

Сейсмометрия, созданная Б. Б. Голицыным, получила у нас широкое развитие в Сейсмологическом институте под руководством П. М. Никифорова. В этом институте много сделано в области строительного и взрывного дела и сейсмической разведки.

О. Ю. Шмидт организовал новый центр геофизических исследований, охвативших весь диапазон вопросов физики атмосферы и твердой оболочки Земли, проблемы происхождения звездного мира и образования континентов. Здесь разработаны различные методы геофизической разведки полезных ископаемых: сейсмический, магнитный, электрический, термический. И. А. Кибелю принадлежит первая научно обоснованная теория прогноза погоды. Продолжана дело рано умершего выдающегося ученого А. А. Фридмана, И. А. Кибель создал сильную школу советских метеорологов.

В. В. Шулейкин в результате систематического изучения явлений, наблюдаемых на морях, создал новую научную область — физику моря. В частности, им были открыты и изучены инфразвуки с частотой порядка 10 гц, вызываемые ветром на морских волнах. Большой интерес представляет его теория влияния океанов на климат и теория атмосферных сейш.

В области радиотехники Н. Д. Папалекси и Л. И. Мандельштам по-новому использовали фазовые явления для измерения расстояний. Большое значение для развития радиофизики имели работы Б. А. Введенского, Д. А. Рожанского. Последний вместе с Ю. Б. Кобзаревым создали методы радиолокации, причем раньше, чем они появились за границей; Г. В. Брауде принадлежит оригинальный метод телевидения.

Советская физика немало сделала для фронта в дни Отечественной войны. Результаты десятков работ использовались на фронте, а некоторые из них получили большое значение.

Для того чтобы правильно оценить сдвиги, произошедшие в физике за 30 лет Советской власти, необходимо противопоставить важнейшие условия, определявшие научную работу в предреволюционной России и в настоящее время.

Вместо сотни физиков, среди которых было не больше 20 докторов наук, мы имеем не менее 2000 ученых и в том числе несколько сот докторов. Вместо 30—40 научных работ за год сейчас мы ежегодно имеем до 3000 исследований крупного научного значения. В одних только физических журналах в сжатом виде

научная продукция занимает не менее 300 листов в год, тогда как до революции в 9 выпусках журнала подробно развернутые статьи едва заполняли 30 листов. Число научных монографий и популярных изданий возросло в десятки раз.

До революции научная работа наряду с педагогической проводилась в скудно оборудованных университетских лабораториях профессором физики и двумя-тремя его ассистентами. Только в Московском и Петербургском университетах были созданы физические институты с десятком преподавателей, да в Академии наук — физическая лаборатория с 3—5 сотрудниками.

Сейчас, помимо трех прекрасно оборудованных физических институтов Академии наук СССР с общим штатом, превышающим 1000 человек, научная работа развернута еще в ряде академических и внеакадемических московских институтов, в физико-технических институтах Свердловска, Харькова, Горького, в институтах и лабораториях республиканских академий: в Киеве, Баку, Ереване, Ташкенте, Алма-Ате, Минске.

Однако этим далеко не ограничивается масштаб научной работы в области физики и ее приложений. Физические работы ведутся в сотнях исследовательских институтов промышленности, из которых некоторые, например оптический, электротехнический, металлургический, являются мощными центрами физического исследования. Кафедры физики университетов и высших технических школ выдвигают и решают значительное число чисто физических вопросов. Следует особо отметить широкое развитие многообразных проблем технической физики, практически полностью отсутствовавшей в царской России. Ежегодные Государственные премии, премии Академии наук, социалистическое соревнование, внимание широкой общественности к достижениям науки являются мощными стимулами научного творчества.

Предусмотренный в плане новой пятилетки рост физического приборостроения уже сказывается на оборудовании наших лабораторий.

До революции все кадры физиков как для высшей, так и для средней школы поставляли 10 университетов с физико-математическими факультетами. Сейчас преподавателей средних школ готовят педагогические вузы. В ряде университетов выделились самостоятельные физические факультеты, готовящие физиков-исследователей; к ним надо присоединить физико-механические и физико-технические факультеты институтов Ленинграда и Москвы.

До революции университеты оставляли несколько окончивших курс студентов «для подготовки к профессорскому званию» и отправляли их с этой целью за границу. Теперь в наших высших школах и исследовательских институтах повышают свои знания и приобретают опыт научной работы сотни аспирантов и докторантов. Защита магистерской и в особенности докторской диссертацией была редким событием в дореволюционной России. Теперь

ежегодно защищают многие десятки кандидатских и докторских диссертаций.

Рост научных кадров не ограничивается аспирантурой. В нашей стране до 1000 исследовательских институтов, где широко развернута творческая научная работа, где на семинарах и научных советах обсуждаются проблемы науки. Все это создает благоприятные условия для научного роста сотрудников.

Съезды физиков и ежегодные конференции по полимерам и спектроскопии, магнетизму и люминесценции, по полупроводникам и по акустике и т. д., и т. д. не только позволяют оценить размах научной деятельности наших лабораторий, но и служат школой физиков. В качестве типичного примера укажу, что в конференциях по полимерам участвуют свыше 60 физических и химических институтов и лабораторий. Популярные журналы, книги и лекции привлекают широкие слои трудящихся, будят их мысль и изобретательность, возбуждают интерес к физическим знаниям.

Как ни ярко приведенные факты и количественные сопоставления настоящего и прошлого, они не дают представления о главном, что дала Октябрьская революция, — о новых путях развития советской науки, о качественном ее превосходстве над буржуазной наукой.

История советской науки неразрывно связана с общим расцветом культуры и народного хозяйства. В условиях социалистического общества наука приобретает новое содержание одного из орудий борьбы за счастье нашего народа и всего человечества. Все свои знания, весь свой опыт советские ученые отдают народу. Вместе с ним они защищали свою Родину в годы войны и создали передовую технику в период индустриализации.

Из побочного занятия преподавателей высшей школы научная деятельность стала делом армии исследователей, выдвигаемой трудовым народом. Разрыв между чистой и прикладной наукой исчезает; они сливаются в едином плане социалистического государства.

Разрозненные научные интересы заменяются широким перспективным планом, сосредоточивающим лучшие силы на узловых, ведущих проблемах и обеспечивающим в то же время развитие всех областей знания. Питаясь собственными корнями, советская наука прокладывает новые пути; исчезает преклонение перед буржуазной наукой и растет патриотическое самосознание.

Узкие рамки отдельных научных дисциплин перекрываются развитием пограничных областей, связывающих математику с астрономией, физикой и химией, физику с химией, геологией, астрономией, биологией, инженерным делом, сельским хозяйством и т. д.

Индивидуальные работы ученых перерастают в коллективное творчество институтов и академий,двигающих науку и решающих важнейшие народнохозяйственные проблемы.

Критика и самокритика, социалистическое соревнование, передовая научная методология диалектического материализма, идейная направленность, указания и деятельная помощь партии и правительства создают почву, на которой расцветают таланты, растут и множатся открытия и изобретения.

Такова советская наука, такова и советская физика.

За 30 лет она охватила весь диапазон от механики до ядерной физики почти без пробелов и вышла далеко за свои пределы в области химии, биологии, электротехники, теплотехники, агрономии, геофизики, изучения моря и геологии. По всему этому обширному фронту советские физики проложили новые пути, создали новые научные направления и научные школы, получившие признание во всем мире. Важнейшие из таких школ я попытался охарактеризовать в настоящем очерке. В эпоху Отечественной войны физики показали себя достойными сынами своей Родины.

Характерной чертой советской физики является тесная связь теории и практики, четкая марксистская методология, плановое развитие важнейших для народного хозяйства областей физики, коллективный характер научного творчества. Благоприятные условия, созданные эпохой бурного строительства социалистической индустрии и сельского хозяйства, привели к мощному росту нашей науки. Тысячи талантливых высококвалифицированных физиков выдвинули из своей среды рабочие и колхозное крестьянство. В десятки раз возрос объем и размах научного творчества; высоко поднят идейный его уровень по сравнению с дореволюционным прошлым. Из года в год Государственные премии не могут охватить всех достойных кандидатов, выдвигаемых страной.

Статья опубликована в юбилейном выпуске журнала «Успехи физических наук», 83, вып. 4, 453—468, 1947, приуроченном к празднованию 30-летия со дня Великой Октябрьской социалистической революции.

## ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ ЛПИ В ЕГО ПРОШЛОМ И НАСТОЯЩЕМ

Построение коммунистического общества ставит перед советской наукой небывалые по своему значению задачи. Уничтожается разрыв между теорией и практикой, наука получает возможность выполнять свою основную цель — совершенствуя технику и экономику, улучшать условия жизни народа. В частности, физика и механика, овладевая силами природы и ставя их на службу человеку, становятся основой технического прогресса.

В отличие от «чистой» физики и чисто эмпирической техники дореволюционной России в Советском Союзе широко разворачивается техническая физика — физика производственных процессов. Для этой новой физики должны быть созданы и новые кадры

инженеров-физиков. С этой целью в 1919 г. в Политехническом институте был основан физико-механический факультет, превратившийся позже в самостоятельный Физико-механический институт и, наконец, в инженерно-физический факультет.

Какие цели ставил себе новый факультет?

Среди многогранной техники нашего времени имеется ряд производств, которые, как и все остальные, вытекая из физики, механики и химии, не успели еще от них отделиться. Таково производство измерительных приборов, оплотехника, производство источников света, телевидение и звуковое кино, теплотехника, авиация, некоторые химические производства. Развитие всех этих производств и сейчас еще тесно связано с ростом физики.

Инженеры, творчески работающие в этих отраслях производства, должны, очевидно, гораздо полнее владеть физикой, механикой, математикой и химией, чем это дается в чисто инженерном вузе. Значительной части инженеров здесь нужны не отдельные сведения по физике, которые можно приобрести на старших курсах, а физика математическая — основа всего инженерного образования. Эти инженеры должны быть в основном физиками.

Университеты не могут создать необходимой для такого воспитания обстановки. Отсутствие технических дисциплин, инженерных лабораторий, крупных специалистов, живой инженерной мысли препятствует росту инженера в стенах университета.

Инженер, в том числе и инженер-физик, должен владеть языком чертежей, должен знать не только по описаниям, но и по собственному лабораторному опыту свойства технических материалов, должен научиться правильно оценивать конструктивные размеры, действующие силы, скорости и ускорения. Все это возможно только в техническом вузе.

Вот те многогранно проверенные практикой соображения, которые неизбежно привели к организации физико-механического факультета в составе Петроградского политехнического института.

Далее, участие физика и механика в промышленности не ограничивается перечисленными «физическими» производствами. В любом производстве он найдет свое место в заводской лаборатории, которая в современных условиях становится самостоятельным цехом всякого передового завода. Контроль качества сырья и продукции, оценка механических, электрических, тепловых, оптических свойств материалов, внесение новых физических методов в практику заводской лаборатории — таковы задачи физика. Все более широкое применение рентгеновских лучей, магнитной дефектоскопии, спектрального анализа, ультразвука, электронной оптики — все это требует подготовки инженеров-физиков.

Наконец, автоматика и сигнализация, охватывающие все новые и новые производства, открывают богатейшее поле деятельности для заводского физика.

Хотя за годы советского строительства вновь созданы многочисленные направления технической физики, но на самых ответственных ее участках все еще имеются пробелы. В любой отрасли техники, выросшей в свое время из физики, и сейчас имеется немало задач для физика.

В каждом втузе, в каждом отраслевом институте должно быть ядро физиков, тесно связанных по своей научной работе с задачами втуза или института. Здесь должны завязываться связи физики со всем многообразием производственных процессов, с контролем хода производства и качества продукции. Это — одна из задач ближайших пятилеток. Для успешного решения этой задачи нужны кадры, которые может и должен создать инженерно-физический факультет.

Новые производства, заводские лаборатории, физические методы контроля, автоматика и телемеханика, втузы и отраслевые лаборатории — таковы те области деятельности инженера-физика, значение которых непрерывно возрастает.

Разумеется, потребность в инженерах-физиках гораздо больше, чем их может дать факультет. В ближайшие годы этот разрыв будет расти. Поэтому необходимо не только расширить прием на этот факультет, но и приступить к организации таких же факультетов при некоторых других втузах.

Значение физико-механического факультета далеко не сразу было понято правильно. Ленинградский политехнический институт еще до революции был одним из немногих центров инженерной мысли и научно-технической работы. Поэтому идея нового факультета была сочувственно встречена передовой профессурой, среди которой были такие выдающиеся ученые, инженеры и педагоги, как А. Н. Крылов, М. А. Шателен, Ф. Ю. Левинсон-Лессинг, А. А. Радциг, М. В. Кирпичев, Е. Л. Николаи и др.

В первые годы своего существования факультет неоднократно подвергался опасности закрытия. Не раз мне лично приходилось выступать в его защиту и доказывать, что отсутствие такого факультета в дореволюционное время вовсе не свидетельствует о его ненужности, что для техники и экономики Советского Союза нужны другие кадры, чем для царской России. В высших инстанциях вопрос о факультете всегда решался в его пользу. Необходимо, однако, отметить, что основное ядро профессорско-преподавательского состава института всегда поддерживало факультет и отмечало его положительную роль в деле роста научно-технического уровня ЛПИ.

Развитие факультета отражало рост нашей промышленности и культуры.

В 1919 г. и во все последующие годы — вплоть до начала первой пятилетки — промышленность наша еще не предъявляла сколько-нибудь значительных требований к физике. Заводы восстанавливали довоенное производство и не принимали заграничный

опыт. Заводские лаборатории еще только начинали организовываться.

Я помню первый наш план организации 113 заводских лабораторий в Ленинградской области — план, казавшийся нам тогда грандиозным. Я помню, как мы боролись за существование заводских лабораторий на всех крупных заводах. Наши самые смелые планы не превышали 500 лабораторий во всей стране. Но это были только планы. Действительность очень медленно их осуществляла.

Зато в тот период быстро росли исследовательские институты и, в частности, связанный с инженерно-физическим факультетом Физико-технический институт. Организованы были также физико-технические институты в Томске и Харькове, подготавливалось открытие институтов в Свердловске и Днепропетровске.

Основная масса студентов инженерно-физического факультета направлялась в эти институты, где и создавала основные кадры. Это обстоятельство наложило свою печать и на учебную жизнь факультета, руководители которого, наряду с технической физикой, одним из основных направлений своей деятельности считали глубокое изучение экспериментальной и теоретической физики. Соотношение между физическим и инженерным образованием имело в эти годы сильный крен в сторону физики.

В эпоху первой и второй пятилеток стала расти роль инженерных предметов. Хотя и сейчас физика сохраняет свое значение как основа учебных дисциплин факультета, обеспечивающих теоретический уровень студенчества, подавляющая часть студентов специализируется по различным разделам технической физики, работает на заводах и пополняет по окончании института кадры заводских инженеров.

Сейчас инженерно-физический факультет — кузница кадров для заводских лабораторий и для физических производств. Кафедры вплотную связались с заводами. Тематика научных работ аспирантов и преподавателей и дипломных работ студентов непосредственно вытекает из потребностей социалистического производства. Перестраиваясь в этом направлении, факультет не снизил теоретического уровня обучения. Естественно, что это направление все больше втягивает факультет в орбиту интересов технических факультетов и делает его органической, составной частью ЛПИ и его научно-технической деятельности.

Об успехах инженерно-физического факультета свидетельствуют списки окончивших его инженеров-физиков. Два академика, два члена-корреспондента Академии наук СССР, многие профессора и доценты факультета являются бывшими его питомцами. Немало насчитывается инженеров-физиков среди руководящих кадров заводских лабораторий, научно-технических институтов и заводских цехов.

Статья опубликована в сб.: Двадцать лет инженерно-физического факультета ЛПИ Л., 1939, с. 5—9.



## БОЛЬШОЕ СЧАСТЬЕ БЫТЬ СТРОИТЕЛЕМ КОММУНИЗМА!

Богата и многообразна жизнь нашей Родины, идущей к светлым перспективам коммунизма. Быть активным участником такой жизни — большое счастье. Найдите область, которая вам по душе, способна вас увлечь, и внесите в это дело все свои силы и способности. Тогда неизбежные трудности и препятствия вам не страшны — вы их преодолете; более того, сама борьба с ними доставит вам удовлетворение. Содержание вашей жизни возрастет еще во много раз, если вы найдете новые, более совершенные пути выполнения стоящих перед вами задач. А для этого нужно непрерывно учиться, учиться до конца жизни и, отталкиваясь от уже известного, искать новое.

На своем опыте я узнал, какую полноту счастья дает настойчивый труд, разрешение загадок, которых еще не мало в окружающей нас природе, какое удовлетворение доставляет сознание, что каждое новое открытие — это новые возможности улучшить жизнь человека, его быт и культуру. Вместе с тем расширяются и наши горизонты — недаром сравнивают научное творчество с постоянным подъемом на все большие высоты; такому подъему нет конца: науку движет вечное стремление вперед. Тем из вас, кто, как и я, изберет путь науки, пожелаю всеми помыслами влиться в этот мощный поток творческой мысли и, вечно учась, направлять свои знания на пользу передового человечества.

Лучшие достижения освещают путь человечества на многие века, подобно идеям и делам Маркса и Ленина, подобно научному творчеству Ломоносова, Менделеева, Павлова, Ньютона и Эйнштейна, подобно произведениям Пушкина, Горького и Маяковского, Шекспира и Гёте, подобно музыке Глинки и Чайковского, Бетховена и Шопена, подобно картинам Леонардо да Винчи и Репина, Рафаэля и Гойи.

Но пути к светлому будущему открывают не только такие гиганты мысли и дела — прогресс создается сознательным движением миллионов людей, вдохновленных общими идеями.

Моя научная жизнь началась вместе с XX веком. В 1900 г. я построил первый железнодорожный мост и прочел первую лекцию. С тех пор я видел появление радио и кино, автомобилей и авиации, радиолокации и телевидения, электронного микроскопа и электронно-счетных машин, ядерных реакторов и атомного ледокола.

Мне дано счастье в меру своих сил участвовать в построении социализма, охватившего около миллиарда людей. Впереди видна уже заря коммунизма.

Моя Родина, которая в начале века была одной из наиболее отсталых стран Европы, за сорок лет стала передовым участком мировой культуры. Уже не десятки, а многие тысячи наших ученых двигают науку, уже наш самолет ТУ-104 обгоняет Солнце, за пределы Земли уходят наши спутники, ядерная энергия под-

чиняется человеку, а моя Родина делает все, чтобы отвлечь ее от разрушения и направить на благо человечества. К Советскому Союзу направлены взоры и лучшие надежды всех передовых людей.

Не замыкайтесь же в себе, в коллективе ярче и богаче станет ваш труд. Желаю и горячо советую вам, мои молодые друзья, все силы своей молодости и зрелости сосредоточить на творческом движении к коммунизму, какую бы из бесчисленных дорог к нему вы ни избрали. Ищите и осуществляйте новое, лучшее — оно есть в каждом деле. Главное — живите и дышите своим делом, никогда не переставайте учиться и двигаться вперед; помните, что вы и ваши товарищи по работе — один дружный коллектив строителей человеческого счастья.

Статья опубликована в кн.: Наука и молодежь. М., 1958, с. 151, вышедшей в свет к 40-летию комсомола.

# ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

## ПРОБЛЕМА НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

В своих выступлениях на конференциях по планированию науки, по генеральному плану электрификации и в газетных статьях я выдвигал ряд проблем, разрешение которых должно поднять технику на более высокий уровень. Однако в тех условиях я не мог изложить соображения, заставляющие считать их реально осуществимыми. В настоящей статье я попытаюсь указать не только задачи, но и имеющиеся в нашем распоряжении средства для их разрешения. При этом я ограничусь лишь важнейшими энергетическими проблемами.

## ПРОБЛЕМА НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТОВОЙ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА

Как известно, современная техника использует лишь те запасы солнечной энергии, которые фиксируют зеленые листья растений или стекающие вниз воды, которые Солнце испарило и потом в виде дождя и снега перенесло на более высокий уровень. Оба эти естественных процесса крайне невыгодны с энергетической точки зрения. Растения используют лишь несколько процентов (от 1 до 6%) падающей на них солнечной энергии и этим вполне разрешают ту задачу, которая приходится на их долю в том цикле преобразования энергии и материи, которым определяется жизнь земной коры. Что энергетическая задача может быть решена значительно полнее, показывают красные водоросли, живущие на глубинах при слабом освещении и использующие 20—25% падающей на них световой энергии. Некоторые фотохимические реакции, изученные в лабораторных условиях, дают цифры гораздо более высокие (до 80%). По сравнению с этими данными обычная для растений степень использования энергии (1%) явно не должна нас удовлетворять.

Не лучше обстоит дело и с водными источниками. Солнечная энергия испаряет воду, затрачивая по 600 кал на 1 кг и сверх того поднимает этот пар на высоту 1—2 км, где он конденсируется в облако. На этот подъем затрачивается 1000 кГм, или

около 2 кал. В большинстве наших гидротехнических установок (Днепрострой, Волховстрой, Свирьстрой) мы используем один-два десятка метров падения, т. е. меньше 0.1 кал на 1 кг воды. На 1 кг воды Солнце затрачивает 602 кал почти полноценной энергии, способной 95%, т. е. 570 кал, превратить в механическую энергию. На наших гидротехнических сооружениях мы получаем около 0.05 кал. Таким образом, коэффициент использования равен всего 0.0001.

Может показаться, что хотя солнечной энергии много, но она так рассеяна, что только на необозримых просторах лесов и морей может дать технически важные результаты, что те поверхности, с которых мы могли бы собирать солнечную энергию искусственными приемами, слишком пичтожны. Но это неверно. Каждый квадратный метр поверхности, поставленный перпендикулярно солнечным лучам, получает около 1 квт энергии. Крыши большого города получают от 10 до 100 млн квт. Если бы мы умели получать 1—2% этой энергии, то имели бы бестопливный фонд от 100 000 до 2 000 000 квт, покрывающий всю потребность в электроэнергии.

Какими же средствами мы располагаем уже в данный момент непосредственного использования солнечной энергии? Помимо фотохимических реакций, которые, вероятно, сделаются основным источником энергии в будущем, но сейчас еще мало применимы, мы рассмотрим три типа солнечных устройств: тепловой, термоэлектрический и фотоэлектрический.

Нагревание, вызываемое Солнцем, весьма велико. Пески Кара-Кума нагреваются до 80° С, несмотря на сравнительно слабое поглощение солнечных лучей и значительную потерю энергии через лучеиспускание. Основным приемом более значительного накопления солнечного тепла являются стеклянные покрытия парников и теплиц. Стекло обладает счастливым свойством: будучи чрезвычайно прозрачным для главной массы солнечных лучей, оно задерживает лучи больших длин волн, излучаемые слабо нагретой почвой и растениями. Подбор наилучших в этом отношении сортов стекла, лаков и красок значительно улучшит результаты. Еще большего можно ожидать от целесообразного подбора газов. О значении их можно судить по роли углекислоты в энергетике земного покрова. Если бы вместо 0.04% углекислоты в воздухе мы имели лишь 0.01%, то температура земной поверхности упала бы ниже 0° и замрзли бы все моря. Наоборот, при 0.4% вся вода испарилась бы. Ничтожные примеси некоторых ароматических органических веществ в десятки и сотни раз повышают поглощение инфракрасных лучей в воздухе. Ни одно из этих имеющихся в наших руках средств для регулирования поглощения и испускания лучистой энергии нами не использовано и даже не изучено. А между тем первые же опыты использования стеклянных перекрытий дали температуру в 140° и даже 240° С. Температуры, которые достигаются в таких поме-

щениях, покрытых одним или несколькими слоями стекол, зависят не только от свойств стекла, но и от потери тепла остальными стенками. Если бы эти стенки граничили с водой или воздухом, уже сначала сильно подогретыми Солнцем, то температура в закрытом ящике была бы выше. Многоступенчатое устройство, в котором нагретый воздух окружал бы ящик, нагреваемый Солнцем, а полученная более высокая температура была бы использована для обогрева следующего внутреннего ящика, в свою очередь нагреваемого Солнцем, и т. д., помогло бы достичь значительно более высоких температур. Этот принцип часто применяется в физике, в технике как низких, так и высоких температур.

Другой метод — регенерации — также мог бы быть широко применен. Если, например, солнечное тепло затрачивается на опреснение воды путем перегонки, то выделяемая при конденсации теплота должна быть использована на подогрев и испарение морской воды. Солнце же должно добавлять лишь такое количество энергии, которое необходимо, чтобы быстро испарять морскую воду при более высокой температуре, чем температура конденсации пресной воды. Другой пример — испарение воды из резервуаров, нагретых Солнцем в жаркие дни, и конденсация пара на холодном стекле в холодные ночи. Наконец, для получения высоких температур можно концентрировать солнечные лучи зеркалами.

Целесообразным использованием указанных средств можно разрешить целый ряд технических задач, существенно влияющих на энергетический баланс. Можно строить парники и теплицы без применения топлива. Можно опреснять морскую воду с достаточно выгодными экономическими показателями. Можно иметь горячую воду для бытовых целей — варки пищи, бань, прачечных и т. п. Можно сушить овощи, выплавлять серу и соли. Можно, наконец, строить котлы и двигатели для орошения и т. п. Технические трудности, которые пришлось бы здесь преодолеть, несколько не большие, чем в любом новом строительстве. Техническая проработка всех этих устройств, проверенная на опытных установках, дала бы твердые основания для внесения солнечной энергии в энергетический баланс южных республик и областей Союза. Экономическая целесообразность определится почти исключительно стоимостью затрат на установку; расходы эксплуатации ничтожны, энергия же даровая. Величина коэффициента использования солнечной энергии также не играет существенной роли, так как дело сводится к использованию больших или меньших поверхностей для собирания солнечной энергии.

С точки зрения экономической целесообразности для использования солнечной энергии могут оказаться вполне пригодными те приемы, которые отвергаются нами для топливных ресурсов. Например, термоэлементы, совершенно непригодные для тепло-

вых станций вследствие своего низкого коэффициента полезного действия, могут оказаться вполне удовлетворительными для солнечных установок благодаря дешевизне и отсутствию ухода.

Рассмотрим для примера следующий случай. Крыша дома сделана наподобие китайских вогнутой и покрыта белой жстью. Вдоль всей крыши на стойках расположен желоб вогнутостью по направлению к крыше; желоб покрыт слоем термоэлектрически активного по отношению к желобу вещества, которое сверху покрыто также металлом. Желоб и внешнее покрытие, между которыми помещено данное вещество, служат электродами термоэлектрической батареи. Рассчитаем два варианта устройства термобатареи: из металлов и из полупроводников. Будем считать, что благодаря концентрации солнечных лучей крышей на  $1 \text{ см}^2$  поверхности желоба падает  $0.2 \text{ кал/сек.}$ , тогда как на поверхность крыши приходится около  $0.02 \text{ кал/сек.}$  Толщину слоя примем в  $5 \text{ см}$  для металла и  $2 \text{ см}$  — для полупроводника, а теплопроводность металла  $0.01$ , а полупроводника  $0.004$ . Тогда разность температур, которая установится на термобатарее, будет составлять для металла  $100^\circ$ , а для полупроводника  $200^\circ$ . При этом на металлическом термоэлементе можно получить около  $5 \text{ мв}$ , на полупроводнике около  $0.1 \text{ в}$ . Считая, что удельное сопротивление металла  $0.001 \text{ ома}$ , а полупроводника  $2 \text{ ома}$ , мы получили бы для энергии, которую можно получить от батареи,  $25 \text{ вт с } 1 \text{ м}^2$ , т. е. до  $2.5\%$  падающей энергии. В действительности, если ограничить свою задачу лишь дешевыми металлами, получение энергии будет вдвое меньше, но и этого, как видно из приведенных данных, достаточно для электрификации того дома, который покрыт такой термоэлектрической крышей. Металлы и полупроводники выгодно делать губчатыми, рыхлыми. Сибирский изобретатель Потанин и проф. Власов предложили способ регенерации теплоты в термоэлементах, который мог бы почти вдвое повысить использование солнечной теплоты. Таким образом, и термоэлемент как метод использования солнечной энергии дает вполне пригодные экономические результаты.

Третий путь — фотоэлемент — еще не достиг такого состояния, чтобы служить для использования солнечной энергии, поскольку его КПД составляет лишь сотые или тысячные доли процента. Но здесь ясно, каким способом он может быть улучшен. Современный фотоэлемент представляет собою либо медную пластинку, покрытую окисью меди, либо железный лист, покрытый слоем селена, с прозрачным или сетчатым верхним электродом. Свет гонит поток электронов из окиси меди или селена в металл, создавая между ними определенную разность потенциалов благодаря находящейся между ними тонкой проводящей прослойке. Но при том способе получения прослойки, которым пользуются в технике, она получается не сплошной. В отдельных многочисленных местах селен и металл непосредственно касаются друг друга, и через эти контакты из металла обратно уходит

главная часть электронов, перепосимых в металл светом. Мы как бы носим воду в решете: на нем остается несколько капель. Можно думать, что, создав искусственно и в фотоэлементах сплошные прослойки, мы обеспечим гораздо более высокие свойства фотоэлемента. Опыт подтверждает эти соображения и позволяет ожидать, что повышение коэффициента полезного действия до 1—2% достижимо. А тогда фотоэлементы получают преимущество перед термоэлементами, так как они не требуют концентрации энергии и могут быть нанесены гораздо более тонкими слоями (десятые доли миллиметра вместо сантиметров).

Если мы не пользуемся Солнцем как источником энергии, то зато широко используем его в агрономии и быту. Однако и здесь мы берем то, что есть, не пытаясь управлять процессами сознательно и систематически. А между тем и в этой области мы не беспомощны. Поглощение и испускание лучистой энергии определяется тонким поверхностным слоем почвы. Достаточно изменить его, чтобы резко повлиять на режим лучистой энергии. Это можно сделать, покрывая почву окрашенной бумагой или слоем лака, нанося жирную копоть или осадок от соответственных газов, выпущенных над полями. Внося окрашенные вещества, сильно поглощающие главную массу солнечных лучей около 0.001 мм длины волны и слабо испускающие при температуре почвы лучи с длиной волны 0.01 мм, мы можем резко усилить прогрев почвы и уменьшить ночное охлаждение. Наоборот, внося вещества, отражающие солнечные лучи и сильно испускающие их, мы предотвратим чрезмерное нагревание почвы. Покрытие жидким, быстро высыхающим лаком (например, целлюлозным) может иметь ряд последствий. В то время как падающий сверху дождь без затруднения будет всасываться почвой через многочисленные трещины и борозды, сделанные для посева, испарение будет ослаблено почти пропорционально закрытой лаком поверхности, т. е. в несколько раз. Поэтому почва гораздо лучше будет переносить засуху. Слой лака во столько же раз уменьшает количество сорных трав. Вследствие малой теплопроводности и отсутствия влажности в слое лака потеря тепла в окружающий воздух будет ослаблена. Стоимость нанесения подобных лаков не превышает стоимости покрытия из бумаги (мульчирования), применяемого для ряда культур и оказавшегося экономически выгодным.

Потеря почвой тепла, уносимого воздухом, в большей степени зависит от состояния поверхности. Потеря может быть уменьшена, если при окончательной обработке почва получает ясно выраженную ячеистую структуру. В углублениях ячеек воздух задерживается и изолирует почву в тепловом отношении. Наоборот, чем лучше перемешивание воздуха над поверхностью земли, тем больше потери тепла почвой. Сама структура почвы, ее прочность, размываемость водой и скорость испарения могут

быть резко изменены введением ничтожных количеств поверхностно-активных веществ.

Покрытие копытю или осадками химических газов может служить мощным средством для усиления таяния снегов. Кавказские горцы посыпают весной снег черной землей и таким путем увеличивают короткий вегетационный период. Н. П. Горбунов предложил подобный способ для усиления таяния ледников на Памире. Возможно, что и для растений в определенных периоды или в определенных климатических условиях дополнительная окраска может оказаться весьма полезной. Если бы при выборе краски для домов мы учитывали не только видимый глазом цвет, но и испускание в инфракрасной области, то могли бы на юге поддерживать здания на более низкой температуре, на севере можно было бы добиться меньшего отвода тепла от стен холодным воздухом.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕВЕРНОГО ХОЛОДА

Значительная разность температур, существующая на далеком Севере между водой, находящейся под коркой льда, и окружающим воздухом, может быть использована для получения механической энергии. Представим себе следующее сооружение. Под льдом находится обтекаемый проточной водой котел, наполненный аммиаком. Нагревая его до  $0^{\circ}\text{C}$ , вода поднимает давление до 4.5 атм. При этом давлении аммиак поступает в турбину или машину, совершенно подобную применяемым для водяного пара. Производя работу, аммиак понижает давление до 0.7 атм, а температуру до  $-40^{\circ}\text{C}$  и переходит в конденсатор, где он при этой температуре конденсируется другой жидкостью, предварительно охлажденной внешним воздухом. Для этого жидкость разбрызгивается и, падая в виде многочисленных капель с громадной поверхности, охлаждается до необходимой температуры. Подсчитывая стоимость отдельных частей такой установки по тем данным, которые применяются для обычных тепловых установок, проф. Власов получил для установок в 5 000—10 000 квт стоимость не выше 150 руб. на 1 квт для Якутска и 250—300 руб. для других районов Сибири. Стоимость 1 квт·часа получается от 1 до 3 коп. Если эти подсчеты, сделанные без конструктивного проекта установки, без учета мер против возможного замерзания жидкости на котле и сооружения для распыления ее, окажутся не совсем точными, то даже увеличение стоимости в 2—3 раза не изменит факта экономической выгоды таких установок на Крайнем Севере, лишенном топлива и других источников энергии. Проф. Власов находит даже, что более дорогие и менее продуктивные термоэлектрические установки благодаря крайней простоте эксплуатации могут оказаться выгодными в определенных климатических условиях. К этой задаче примыкает и другая, относящаяся к эксплуатации теплофикационных цент-



ральных станций. Отопительная система возвращает теплую воду при температуре на несколько десятков градусов выше водопроводной воды. И эта разность температур могла бы быть использована для получения механической и электрической энергии.

## АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

При оценке машин для использования новых источников энергии — солнца, ветра, северного холода и т. п. — приходится исходить не из коэффициента полезного действия, а из стоимости установки и занимаемой полезной площади. Однако эти источники обладают еще одним существенным недостатком: они дают энергию часто не тогда и не там, где она нужна. Их экономическая целесообразность поэтому в большей мере зависит от возможности запастись, например, дневную энергию на ночь или передавать на места потребления. Важнейшим вопросом является дешевый и легко транспортируемый аккумулятор. Зато важнейшая для современного энергетического хозяйства его характеристика — коэффициент полезного действия — имеет сравнительно меньшее значение. Эта новая постановка вопроса допускает и новые решения. Предположим, например, что на местах дешевой энергии мы затрачиваем ее для получения алюминия, а затем этим алюминием пользуемся в качестве электрода в гальваническом элементе. Если мы получим только треть затраченной энергии, это может оказаться крайне выгодным, например, для некоторых видов транспорта. Проф. В. Г. Глушков предложил пользоваться дешевой энергией для разложения воды, передавая затем полученный водород по трубам на большие расстояния. Соединяя водород с кислородом воздуха, можно вновь получить значительную часть затраченной энергии и воду. Очевидно, можно придумать и ряд других дешевых и невысоких по качеству аккумуляторов. Выработка практически пригодного типа такого аккумулятора — одна из актуальных задач электрохимии.

## ОТОПЛЕНИЕ

Несовершенство современных методов отопления и громадные количества топлива, на него затрачиваемые, заставляют задуматься о других способах поддержания достаточной температуры в зданиях. Наши печи используют 10%, лучшее центральное отопление — около 50% теплоты, выделяемой топливом. Это еще не так плохо. Но энергию приходится оценивать не только количественно, но и качественно. Если судить об энергии по количеству механической или электрической энергии, которые можно извлечь из данного запаса, то следует сказать, что химическая энергия 1 кг угля, выделяющего 8000 кал, могла бы дать не менее 8000 кал электрической энергии, если бы мы умели пре-

вратить ее без потерь. На лучших электростанциях мы все же получаем только до 2500 кал. Это количество определяется высокой температурой в топке парового котла. В зданиях же мы хотим создать температуру всего в 20° С. При этой температуре те же 8000 кал могли бы дать при температуре внешнего воздуха в 10° С не больше 800 кал электроэнергии. Наоборот, затратив 800 кал электроэнергии, мы могли бы ввести в здание 8000 кал тепла при 20° С. Остальные 7200 кал были бы взяты от внешнего холодного воздуха. Эти цифры характеризуют теоретические возможности и не учитывают потерь в наших машинах. Практически соотношения в 2—3 раза ухудшаются: для сообщения 8000 кал потребуется не меньше 2000 кал электроэнергии.

Исходя из расхода топлива, сравним два способа согревания помещения: 1) для того чтобы ввести в здание 8000 кал тепла при коэффициенте полезного действия в 50% путем центрального отопления, потребуется 2 кг угля; 2) для той же цели можно взять от электростанции, скажем, 3000 кал электроэнергии, приводящей во вращение мотор холодильной установки. Эта установка, охлаждая обтекающий ее внешний воздух, будет согревать воздух, направляемый в здание, и сообщать ему те же 8000 кал. На электрической же станции для получения 3000 кал электроэнергии потребовалось немногим больше 1 кг угля. При втором способе отопления здание должно быть оборудовано достаточно мощной холодильной машиной, которая летом может служить как холодильная установка, вместо котлов и отопительных батарей.

Целесообразное решение задачи отопления с минимальным расходом топлива представляется в следующем виде. Электрическая станция теплофицирует отходящим теплом своих турбогенераторов прилегающий район. Однако соотношение между потреблением электрической и тепловой энергией таково, что отопить весь город, который станция освещает, невозможно. В более отдаленные районы подается электрическая энергия, которая в упомянутых холодильных установках затрачивается на согревание помещения.

Наконец, есть еще один способ экономии топлива. Количество топлива, затрачиваемого на согревание здания, определяется охлаждением через внешние стены и крышу. Чем больше площадь пола по сравнению с поверхностью стен, тем меньше приходится топлива на единицу полезной площади. В тех местностях (например, на Крайнем Севере), где отопление является центральным вопросом жилищного строительства, можно учитывать возможность использования помещений без внешних стен, окруженных со всех сторон жилыми комнатами той же температуры, что и данное помещение. Оно тогда ничего не теряет, его не нужно и отапливать. Несомненно, что целый ряд помещений не требует внешних окон, и, следовательно, при целесообразной застройке их не требуется и отопления. Не только залы для кино и театров,

по и некоторые заводы и фабрики могли бы значительно улучшить условия труда, если бы, не рассчитывая на боковое освещение окон, рационально распределили электрическое освещение. Вместо отопления на первый план стал бы вопрос о вентиляции и об электрических источниках света. Необходимо увеличить количество полезных для здоровья ультрафиолетовых лучей. Уже сейчас имеются удобные и недорогие источники, дающие электрический свет, по составу не отличающийся от солнечного. Можно с уверенностью ожидать, что в течение ближайших двух лет будут практически разработаны лампы со светящимся газом, гораздо более дешевые и более богатые ультрафиолетовым светом. Тогда этот вопрос станет весьма реально на очередь, и количество помещений, в которых можно будет отказаться от окон, а следовательно, и от затрат на отопление, возрастет. Но и по отношению к окнам вопрос об ультрафиолетовом свете не теряет своего значения. Наши оконные стекла его не пропускают, хотя производство стекол прозрачных и для этих лучей стоило бы не так уж дорого. Гигиеническое значение этих стекол громадно.

В настоящей статье я ограничился рассмотрением нескольких энергетических проблем, которые считаю разрешимыми в ближайшее же время. Это — задачи второй пятилетки. Я перечислю еще ряд задач более отдаленных, но тоже не невозможных. Обратимое окисление угля, которое в три раза повысило бы использование угля для механической и электрической энергии. Газогенераторы и газопроводы, удешевляющие транспорт топлива. Атмосферное электричество, энергия волн, приливов и отливов, внутренняя теплота Земли — все это громадные количества энергии, слишком рассеянной, мало концентрированной для условий современной техники. Первые же успехи в области регулирования погоды, хотя бы выпадения дождей, позволили бы усилить осадки в высоких местностях за счет более низких и таким образом резко усилить запасы водных сил. Меньше всего можно в данное время сказать о возможности использования внутриатомных источников энергии при преобразовании элементов. Мы знаем, насколько велики количества энергии в этих случаях, но совсем не знаем, как ими управлять.

Статья опубликована в журнале «Социалистическая реконструкция и наука», вып. 1, с. 23—29, 1932.

## МЕМОРИАЛЬНЫЕ И АВТОБИОГРАФИЧЕСКАЯ СТАТЬИ

### ВИЛЬГЕЛЬМ КОНРАД РЕНТГЕН

Вильгельм Конрад Рентген родился в 1845 г. в Германии, вблизи голландской границы, в г. Ленепе. Сначала он готовился к деятельности инженера и окончил политехникум в Цюрихе, но ясно выразившийся еще на студенческой скамье интерес к физике определил его поступление в университет. После защиты докторской диссертации он стал ассистентом по кафедре физики сначала в Цюрихе, потом в Гиссене, откуда вместе со своим профессором Кундтом переехал в Страсбург. В качестве экстраординарного профессора он работал сначала в Гиссене, а затем снова в Страсбурге. Оттуда Рентген перешел на ординарную кафедру в Гиссен, затем в Вюрцбург и наконец в 1900 г. — в Мюнхен. В 1919 г. по достижении предельного возраста Рентген передал свою кафедру В. Вину, но сохранил за собой заведование Метрономическим институтом в том же помещении Физического института Мюнхенского университета. Здесь он продолжал работать до самых последних дней своей жизни. Скончался Рентген в возрасте 78 лет 10 февраля 1923 г.

Свою физическую школу Рентген получил у Кундта, который воспитал целую плеяду крупных экспериментаторов. К их числу принадлежали и русские физики — Петр Николаевич Лебедев и Александр Александрович Эйхенвальд. Помимо Кундта, Рентген был близок и с другими крупными современниками: Гельмгольцем, Кирхгофом, Лоренцем, но с годами стал все больше замыкаться в себе, и связь его с другими физиками ограничивалась чисто деловыми и научными отношениями. Он не посещал съездов естествоиспытателей, а в своей частной жизни и во время путешествий не выходил из круга своих ближайших ассистентов и нескольких старинных друзей — математиков, философов, врачей. Поэтому личное его влияние на физиков, не бывших его учениками, невелико. Он пользовался славой лучшего экспериментатора. Когда умер Друде, его избрали на кафедру физики Берлинского университета; после ухода Кольрауша ему был предложен пост президента «Physikalisch-technische Reichsanstalt», а после смерти вант Гоффа — место академика. Однако

Рентген отклонил все эти предложения, точно так же как и предложения дворянства и различных орденов (в том числе и русских), последовавшие за его открытием, а сами лучи до последних лет жизни называл X-лучами.

Из числа его учеников многие занимают кафедры, и на всей их научной деятельности чувствуется влияние школы Рентгена. Сказанное относится к следующим лицам: М. Вину, Л. Цендеру, П. П. Коху, Э. Вагнеру, А. Шмауссу, Р. Ладенбургу, П. Прингсгейму, Э. Ангереру, Валентинеру, Фридриху, дю Прелю и Иоффе.

В течение своей более чем пятидесятилетней научной деятельности Рентген напечатал около 50 работ, посвященных нескольким вопросам. Наиболее известные из них — это открытые им рентгеновские лучи и рентгеновский ток (магнитное поле движущегося в электрическом поле диэлектрика). Большое число его работ посвящено свойствам жидкостей (сжимаемости, внутреннему трению, поверхностному натяжению), газов (поглощению инфракрасных лучей, измерению  $c_p/c_v$ ) и кристаллов (пьезо- и пьезоэлектричеству, электро- и пьезооптическим свойствам). Рентген первый изучил вязкость смолистых веществ; ряд его работ посвящен электрооптическим явлениям (двойному преломлению в жидких и кристаллических телах, в электрическом поле, ионизации кристаллов светом). Каждая работа печаталась только тогда, когда результаты ее Рентген считал совершенно законченными. Большое число произведенных им опытов не было опубликовано, так как в них оставались еще неясности.

Блестящий экспериментальный талант, ясная и простая постановка опытов, всесторонний и тонкий анализ возможных ошибок, наивысшая точность и достоверность полученных результатов — вот черты, общие всем его 50 работам, сделавшие их классическими. Значительная часть его работ имеет измерительный характер. Рентген всегда достигал большей точности, чем другие, и многие его измерения остались рекордными и через 40 лет ( $c_p/c_v$ , сжимаемость и др.). Однако этой точности он добивался не усложнением аппаратуры и многочисленными поправками (подобно, например, Реью), а применением нового целесообразно придуманного метода, который в корне устранял важнейшие ошибки и позволял получать точные результаты при помощи простых, часто самодельных приборов, отвечавших его вкусу, как он сам выразился в одной из своих заметок. Так, например, в течение долгих лет шел спор между двумя крупнейшими физиками Тиндалем и Магнусом о том, поглощают ли водяные пары инфракрасные лучи. Опыты Тиндаля давали положительный ответ, Магнус всегда находил в них ошибки и отрицал поглощение. Плотность паров невелика; нужно было очень точно знать количество лучей, входящих в пар и выходящих из него, чтобы измерить небольшую разность, поглощенную паром. Взбирались даже на Монблан, чтобы установить поглощение

в воздухе между вершиной Монблана и его подошвой. Рентген, поставив себо этот вопрос, поступил проще: он измерил то повышение давления, которое должно произойти в замкнутом сосуде с водяным паром или другим газом вследствие нагревания поглощенными лучами. Без сложных приборов и грандиозных затей ему удалось не только установить факт поглощения, но и измерить его количественно.

Столь же характерна и его работа о рентгеновском токе. Диэлектрик вращается между заряженными пластинами конденсатора и создает магнитное поле. Могло бы появиться сомнение, не течет ли ток по самим металлическим пластинкам конденсатора и не этот ли ток вызывает магнитный эффект. Рентген уничтожает это сомнение простым опытом. Пластинки изготавливаются из металлических секторов, отделенных эбонитовыми прокладками; тока в пластинках быть не может, а эффект Рентгена остается неизменным.

Любопытно, пожалуй, отметить, что и знаменитый метод Кундта скрещенных спектров, который обнаружил аномальную дисперсию, вызван критикой Рентгена. Последний, как дальтоник, плохо отличал красные цвета от синих, и поэтому его нисколько не убедило изменение порядка цветов в спектре. Он потребовал от Кундта более объективного доказательства, не зависящего от зрения того или другого физика, и в результате подробного анализа возможностей Кундт придумал свой метод.

Важнейшими из работ Рентгена являются, несомненно, три его статьи «О новом роде лучей», напечатанные в 1895—1897 гг. Они создали ему мировую славу, за них Рентген получил Нобелевскую премию, они оказали самое решительное влияние на все последующее развитие физики. Открытие рентгеновских лучей Рентгеном часто приводят в качестве примера роли случайности в науке. Правда, изучение катодных лучей в разреженных газах подготовило почву для Рентгена, но, несомненно, требовалась недюжинная наблюдательность, чтобы, едва принявшись за изучение катодных лучей, сразу заметить создаваемые ими новые, рентгеновские, лучи. Трубки с катодными лучами существовали уже 40 лет, но никто из работавших с ними (в том числе и Ленард, считающий, что он имел в своих опытах дело с этими лучами) не заметил испускаемых ими рентгеновских лучей. Во всяком случае не случайно, а теснейшим образом связана со всей научной личностью Рентгена та форма, в которую вылилось его исследование. В трех небольших статьях, опубликованных на протяжении одного года, дано настолько исчерпывающее описание свойств этих лучей, что сотни работ, последовавших затем на протяжении 12 лет, не могли ни прибавить, ни изменить ничего существенного. И все это исследование в совершенно новой области было проведено самыми элементарными средствами: единственный «прибор», которым пользовался Рентген, — это электро-

склон с листочком. Для изучения каждого свойства лучей им были придуманы новые чрезвычайно остроумные методы, по раз затем использованные в самых разнообразных случаях.

Вспомним некоторые из таких приемов Рентгена.

1. Отражение. Рентген заметил, что лучи не отражаются заметно даже от хорошо полированных поверхностей. Можно было, однако, думать, что разница (по сравнению со светом) здесь только количественная: коэффициент отражения рентгеновских лучей очень мал. Но вместо того, чтобы улучшением измерительных приборов измерить эту малую величину, Рентген устанавливает, что истолченное в порошок и цельное вещество одинаково прозрачны для рентгеновских лучей; отсюда следует, что многочисленные поверхности отдельных зерен истолченного тела отражают и рассеивают лучей не больше, чем внутренность целого тела. Рентген дает совершенно точное описание рассеяния и поглощения лучей, сравнивая тело с комнатой, полной табачного дыма, сквозь который проходит луч света. Каждый атом внутри тела и на его поверхности рассеивает лучи одинаково и тем сильнее, чем больше его атомный вес. Рентген ставит вопрос, идентичны ли рассеянные лучи с первичными, и совершенно правильно предполагает, что наряду с отклоненными первичными лучами появляются еще другие, всегда более мягкие лучи, созданные атомами рассеивающего тела. Сама характеристика жесткости лучей по их поглощаемости, сохранившаяся и после открытия Лауэ, наряду с количественной спектроскопией, принадлежит Рентгену.

2. Ионизация. Рентген обнаружил эффект разряжения наэлектризованного тела под влиянием лучей и сейчас же установил, что главную роль в этом явлении играет ионизация воздуха. Лучи, проходящие мимо наэлектризованного тела, разряжают его так же, как и лучи, прямо на него падающие. Однако и этот эффект можно приписать вторичным лучам, вызванным в воздухе и попадающим на тело. Рентген показывает, что если засосать через длинную трубку освещенный лучами воздух, то он сохраняет способность разряжать заряженное тело. Поместив на пути ионизированного воздуха в трубе ватную пробку, можно лишить воздух его способности снимать заряды с тел. Чтобы удостовериться, что причина этого явления лежит в соприкосновении ионизированного воздуха с поверхностями пор в вате, а не в замедлении движущегося в трубе воздуха, Рентген помещает ту же пробку в такое место трубы, через которое воздух проходит еще до ионизации (по другую сторону освещенного лучами участка трубы). Движение воздуха в трубке замедляется одинаково, куда бы ни поместить пробку, между тем как разряжающая способность сохраняется только в том случае, если ионы не соприкасались с ватой.

3. Первые же опыты с лучами приводят Рентгена к правильной конструкции трубки: наклонный платиновый антикатод,

вогнутый алюминиевый катод. Сделанные им тогда же снимки являются образцами экспериментального искусства. Так, он получил, например, изображение надписи, выгравированной на стволе охотничьего ружья: предельное достижение и для современной рентгеновской техники.

4. О необыкновенном экспериментальном чутье Рентгена свидетельствуют его настойчивые попытки обнаружить эффект, через 17 лет открытый Лауэ. Установив, что лучи рассеиваются каждым атомом, Рентген заключает, что при правильном расположении атомов, имеющем место в кристалле, рассеяние и поглощение должны зависеть от направления. Он ищет это явление в обстановке, весьма напоминающей опыты Лауэ и Фридриха, но только с фотографической пластинкой, прижатой к кристаллу. Более тонких соображений о дифракции или интерференции у него быть не могло, так как волновая природа лучей не была известна. Но и основные соображения Рентгена настолько убедительны, что в каждой из трех работ он повторяет свою уверенность в существовании эффекта, несмотря на то, что все его попытки дали отрицательный результат. Если бы даже и случай, столь благоприятствовавший ему в открытии лучей, заставил Рентгена поставить фотографическую пластинку на правильное место, то все же при малой мощности тогдашних трубок он вряд ли мог бы обнаружить искомый эффект. Ведь и первые опыты Фридриха, знавшего, что он ищет, дали отрицательный результат, и только наугад поставленная Книппингом на пути лучей фотографическая пластинка привела к открытию Лауэ. В 1895 и 1896 гг. не было еще почвы для нового открытия, но Рентген знал, где его искать. Не оправдалась гипотеза Рентгена о физической природе его лучей, как о продольных колебаниях эфира, но, принимая во внимание происхождение лучей при продольном толчке катодного потока и резкое их отличие от световых, нельзя не считать гипотезу Рентгена весьма естественной для того времени.

Наряду с этими образцами качественного исследования, Рентген умел выполнять и точнейшие измерения там, где это требовалось постановкой задачи. Так, например, он видел, что нельзя создать теорию жидкого состояния, не имея полной количественной характеристики свойств различных жидкостей и растворов. И эту работу он выполнил с удивительным мастерством и последовательностью, затратив на нее десять лет (с 1883 по 1892 г.). Измерения постоянных воды и водных растворов привели его в 1892 г. к представлению, что вода — это равновесная система молекул различного состава. Такой же количественный характер получил вопрос о связи пиро- и пьезоэлектричества. Работы 1913—1914 гг. полностью подтвердили, что пироэлектричество без остатка сводится к пьезоэлектричеству. Сюда же относятся классические опыты определения  $c_p/c_v$  с помощью удачно поставленного на анероиде зеркальца, измерение тепло-



вого расширения алмаза при низких температурах. приведшее к теории Дебая.

По всем своим взглядам и деятельности Рентген был типичным представителем классической физики второй половины прошлого столетия. К той же школе принадлежали Кундт, Варбург, Кольрауш, Рубенс, Браун, Пашен — почти все уже ушедшие от нас. Рентген больше, чем кто-либо из современников, способствовал созданию новой физики нашего столетия — физики элементарных процессов и электронных явлений. Тем не менее сам он оставался верен прежним заветам и сторонился того потока не всегда достаточно обоснованных «открытий» и гипотез, который последовал за его собственным открытием.

Методом его работы был последовательный формализм, отрицавший изучение механизма явлений. Вот пример его отношения к работам с открытыми им лучами. Темой моей работы было изучение упругого последействия в кварце при помощи пьезоэлектрического метода. Однако по ряду соображений я пришел к заключению, что последействия в кварце вовсе не существуют, а наблюдаемые явления вызваны пьезоэлектрическими зарядами в массе кристалла. Чтобы удалить их, я хотел увеличить электропроводность лучами радия и рентгеновскими лучами. Это действительно удалось. После этого я исследовал другие кристаллы и диэлектрики. Накопив интересный и часто неожиданный материал, я поспешил сообщить его Рентгену, находившемуся тогда в Santa Margareta. В ответ я получил открытку следующего содержания: «Я жду от Вас солидной научной работы, а не сенсационных открытий. Вернитесь к упругому последействию». Возвратившись в Мюнхен, Рентген объяснил свой совет антипатией к многочисленным поспешным опытам с рентгеновскими лучами и радием. Ко всякому, кто занимался этими опытами, он относился с недоверием и считал, что не следует начинать свою научную деятельность с изучения именно этих вопросов. Лишь путем острого конфликта я получил разрешение продолжать свои опыты. Только когда я обнаружил, что электропроводность рентгенизированной каменной соли резко меняется при освещении обычным светом, Рентген, увидав здесь новую связь между светом и электричеством, заинтересовался работой и принял в ней участие. С тех пор до самой смерти Рентгена мы работали совместно над этой проблемой.

Другой яркий пример — отношение Рентгена к электрону. До 1906—1907 гг. слово электрон не должно было произноситься в Физическом институте Мюнхенского университета. Рентген считал представление об электроне недоказанной гипотезой, применяемой часто без достаточных оснований и без нужды. В течение двух лет я ежедневно в разговорах с Рентгеном пользовался этим понятием, чтобы показать его проявление в самых разнообразных явлениях. И только через 2 года электрон получил права гражданства в Мюнхене.

Рентген придавал значение лишь фактам, а не их объяснению. Наше исследование кристаллов за 7 лет, с 1904 по 1911 г., привело к пониманию явления электропроводности. Предлагая мне изложить наши результаты для печати, Рентген настаивал, чтобы я систематически изложил наши наблюдения, не создавая у читателя предвзятых мнений своими объяснениями. Мне, наоборот, казалось необходимым излагать факты в свете той картины явления, которая из них вытекает. Чтобы убедить в преимуществе такого изложения, я расположил весь громадный материал в 7 главах без всяких пояснений и затем на двух листочках изложил «разгадку семи загадок». В течение трех дней Рентген проверял, действительно ли каждый опыт объясняется моей разгадкой и наконец согласился включить разгадку в текст. Однако в таком виде статья настолько противоречила его принципам, что он ее так и не сдал в печать. Только в 1913 г. он опубликовал введение, заключающее методику измерения и приборы, и в 1921 г. — опыты с каменной солью: 200 страниц одних опытных фактов. В 1922 г. Рентген предложил мне самому дать изложение вопроса. Эта статья, корректуру которой он еще самым тщательным образом проверил, появилась вскоре после его смерти в 1923 г. Все остальные свои незаконченные работы (вместе с ними оказались также и результаты моих опытов в Петрограде) он завещал сжечь после его смерти, что и было выполнено.

Рентген высоко ценил лучших представителей «новой физики»: Д. Д. Томсона, Резерфорда, Милликена, Зоммерфельда, Эйнштейна и Бора (кандидатуру последнего он даже представил на Нобелевскую премию), но сам держался от нее в стороне. И чем больше появлялось в немецкой научной литературе скороспелых «предварительных сообщений», тем основательнее и документальнее становились его работы, — последняя со своим опытным материалом заняла целую книжку «Анналов» в 200 страниц. Из-за последовательно проведенного формализма в изложении она трудно читается.

Таким же последовательным, верным раз и навсегда выработанным принципам оставался Рентген и в частной жизни. Он не был дипломатом, не умел приспосабливаться к обстановке. На факультете и в Академии он вел свою линию, не считаясь ни с какими влияниями. Когда после отказа Лоренца Рентген счел нужным предложить кафедру теоретической физики в Мюнхенском университете Зоммерфельду, действительно поднявшему ее на большую высоту, он не побоялся вступить в самый ожесточенный спор с влиятельной группой математика Линдемана. Ему пришлось проделать большую работу, чтобы опровергнуть возражения Линдемана против одной из основных работ Зоммерфельда и добиться его избрания.

Рентген не допускал ни для кого из своих ассистентов и учеников никаких уклонений от того метода работы, который он считал единственно научным, и здесь бывал часто слишком прямо-

линейным. Но так же последователен он был и с властью имущими: Вильгельм II при посещении Германского музея в Мюнхене, выслушав объяснения Рентгена к физическому отделу, попытался так же объяснить Рентгену артиллерийский, но не мог ничего сказать, кроме общеизвестных тривиальных фраз. Рентген прямо так ему и сказал, после чего Вильгельм, отвернувшись, немедленно ушел, оскорбленный в своей гордости военного специалиста.

В 1917 г. вследствие блокады в Германии царил голод, и все население получало распределявшиеся по карточкам скудные продукты питания. Рентген имел в Голландии много друзей, посылавших ему продовольственные посылки с маслом и сахаром. Однако, считая, что при таком положении в стране никто не должен пользоваться привилегиями, он все свои посылки сдавал государству для общего распределения. За год он потерял  $1\frac{1}{2}$  пуда в весе, и только когда врачи заявили, что еще месяц такой жизни приведет его к смерти, он согласился принять повышенный больничный паек.

Для ведения войны государству необходима была валюта. Все значительные капиталы Рентгена были помещены в голландских бумагах, и все он отдал без остатка по первому требованию. Он и здесь не знал компромиссов и из сотен тысяч не оставил себе ни гульдена. Последние годы своей жизни он принужден был отказывать себе во многом. Только раз в неделю он позволял себе мясное блюдо. Чтобы исполнить свое желание — перед смертью снова посетить места в Швейцарии, где он жил с незадолго перед тем скончавшейся женой, — он должен был почти на целый год отказаться от кофе и т. п.

Рентген был большой и цельный человек в науке и в жизни.

Вся его личность, его деятельность и научная методология принадлежит прошлому. Но только на фундаменте, созданном физиками XIX в. и в частности Рентгеном, могла появиться современная физика. Рентгеновский ток был толчком в электронной теории; рентгеновские лучи — к электронике и атомистике. На этом прочном фундаменте выросло новое здание. Если яркая окраска ипных деталей этого здания часто и противоречила его вкусу, то все же фундамент, материал и методы для постройки дал нам Рентген.

Впечатление, вызванное открытием Рентгена, было чрезвычайно велико. В течение только 1896 г. о нем было напечатано более 1000 статей. Появились сотни научных работ, посвященных этим лучам, и ряд попыток открыть еще какие-нибудь новые лучи. После большего или меньшего периода оказывалось, однако, что лучи эти были плодом недоразумения или ошибок наблюдения (лучи Герца, Blondlo, F-лучи и т. п.). Работы по рентгеновским лучам в течение 12 лет также не могли прибавить ничего существенного к результатам, установленным Рентгеном в его первых работах. Не только самое открытие новых лучей, но и их исследование, классическое по своей простоте, объективности и полноте, произведенное с самодельными приборами по совершенно

новым методам, легшим в основу позднейшей физики, — представляет собой выдающуюся заслугу. Вполне по праву Рентгену первому была присуждена Нобелевская премия по физике. Теперь, после 30-летнего изучения рентгеновских лучей, открывшего нам наконец их природу и объяснившего их свойства, мы можем еще лучше, чем современники Рентгена, оценить необычайную точность его наблюдений и умение находить в хаосе фактов характерные черты нового явления.

Статья опубликована в качестве предисловия к кн.: В. К. Рентген. О новом роде лучей. М.—Л., 1933, с. 5—20. В эту книгу, редактором которой был А. Ф. Иоффе, включены первые и основные публикации Рентгена 1896 г. об открытии им нового рода лучей. Работы Рентгена кратко прокомментированы А. Ф. Иоффе.

А. Ф. Иоффе написал еще три статьи о Рентгене: некролог, опубликованный в журнале «Успехи физических наук», 4, 1—8, 1924, и включенный в 1-й том «Избранных трудов» А. Ф. Иоффе (с. 317—324), а также статьи в «Природе», № 2, 107, 1938 — к 15-летию со дня смерти Рентгена и в книге: Очерки развития медицинской рентгенологии. 50 лет рентгеновых лучей в медицине. М., 1948, с. 29.

## МАРИЯ СКЛОДОВСКАЯ-КЮРИ

Мария Склодовская родилась в 1867 г. в Варшаве и окончила там гимназию. Из школы и польской семьи (отец и мать ее были преподавателями средней школы) она вынесла мечту об освобождении Польши от царского ига, о свободе и социализме, глубокое уважение к науке и стремление к личной самостоятельности. С этими настроениями в 1892 г. она приехала в Париж, где вскоре познакомилась и подружилась с одним из самых талантливых физиков Франции Пьером Кюри и в 1895 г. вышла за него замуж. Одиннадцать лет жизни и совместной работы с этим замечательным экспериментатором и мыслителем, несомненно, наложили свой отпечаток на научное творчество Марии Склодовской, как на творчество Ланжевена, Перрена и других учеников и друзей П. Кюри. Но совершенно ложно и ни на чем не основано мнение, что в величайшей совместной работе супругов Кюри — открытии радиоактивности — мадам Кюри принадлежала лишь роль технического помощника. Такое мнение, когда оно высказывалось, основывалось лишь на «принципиальном» недоверии к женщине, к ее способности подняться до вершин творческой деятельности.

Всякий, кто на самом деле прочтет работы мадам Кюри за этот героический период открытия полония и радия и затем почти за 30-летний период после смерти Пьера Кюри, увидит такую общность научного стиля, такое единство индивидуальности, что он принужден будет расстаться со своими «принципиальными» предрассудками. 40 лет научной деятельности мадам Кюри, это — цельный, непрерывно растущий вширь и вглубь поток научного творчества. Не только в молодости, но и до самой смерти мадам Кюри и ее школа шли в первых рядах мировой науки. Она не за-

мыкалась, подобно многим старым ученым (Дж. Дж. Томсону, Ленарду и др.) в область своего личного опыта и своих взглядов, но знала, учитывала и использовала каждый новый шанс других школ радиоактивности (Резерфорда и Лизы Мейтнер).

В октябре 1933 г. я участвовал вместе с мадам Кюри в конгрессе Сольвея, посвященном атомному ядру. Ее выступления и замечания на заседаниях, ее беседы со мной ясно показали, как глубоко она продумала все новейшее развитие учения о ядре, как широки были ее эрудиция и личный опыт в этих вопросах. В то же время она отличалась исключительной скромностью. Ни малейшего намёка на свой авторитет; чисто объективные соображения, вызванные интересом к вопросу, а не желанием подчеркнуть свою роль в его разрешении. Нобелевская премия, которую супруги Кюри получили еще в 1904 г., почести в Америке и Польше несколько не изменили скромной и увлеченной своей наукой мадам Кюри.

Всегда, даже в годы военного и послевоенного национального угара, мадам Кюри оставалась верна своим передовым, прогрессивным убеждениям. Она всегда была верным другом Советского Союза, членом Общества друзей новой России. Я помню, сколько энергии она затратила, чтобы дать возможность работать в ее институте советскому физическому Д. В. Скобельцыну.

Мадам Кюри пришлось на себе испытать всю ханжескую тугопуть буржуазной морали. Ее поездка на научный конгресс послужила поводом к газетной травле против нее, к обвинениям в нарушении «приличий». И этого оказалось достаточно, чтобы Академия наук «провалила» ее кандидатуру и выбрала вместо нее посредственного электротехника Бранли.

В 1895 г. Рентген открыл новые лучи, исходящие из пустотной трубки, в которой создавались катодные лучи (поток электронов, как потом оказалось). В месте удара катодных лучей о стеклянную стенку стекло светится зеленым светом и отсюда же исходят рентгеновские лучи. Анри Пуанкаре предположил, что источником лучей служит самое свечение стекла, и, судя по его личным рассказам, рекомендовал Рентгену посмотреть, не испускают ли подобных лучей все светящиеся (фосфоресцирующие) тела. Рентген уже знал на основе своих опытов, что испускание рентгеновских лучей не связано со свечением стенок трубки. Еще лучше получались лучи, когда катодные частицы ударялись о платиновый антикатод, не вызывая в нем видимого глазу свечения. Однако указание Пуанкаре подхватил Анри Беккерель и стал изучать давно известное свечение урановых руд. Оказалось, что это свечение, подобно рентгеновским лучам, сопровождается испусканием лучей, проходящих сквозь черную бумагу и вызывающих почернение фотографической пластинки.

Что же является источником непрерывного испускания лучей и непрерывной, следовательно, потери энергии? Этот вопрос и поставила себе мадам Кюри, которая привлекла к его исследова-

пию своего мужа. Методика, применявшаяся при изучении открытых им явлений пьезоэлектричества, была положена в основу изучения нового явления: количественной мерой лучей служил ток, проходящий под их воздействием сквозь воздушный конденсатор. Этот ток компенсировался и измерялся пьезокварцем Пьера Кюри. Чтобы скомпенсировать ток, идущий от заряженной пластинки конденсатора к незаряженной, нужно было нагружать соединенную с ней кварцевую пластинку определенными грузами. Этим точным методом супруги Кюри прежде всего установили, что интенсивность лучей определяется исключительно содержанием урана и не зависит от того, в каких соединениях он встречается в данном образце. Следовательно, источник лучей — атомы урана.

Перепробовав все другие известные тогда химические элементы, супруги Кюри нашли, что наряду с ураном один лишь торий дает такие лучи. Это новое свойство атомов некоторых элементов мадам Кюри назвала радиоактивностью. Название это сохранилось и сейчас.

Проверяя свой закон не только на искусственно приготовленных солях урана и тория, но и на содержащих эти элементы минералах, мадам Кюри убедилась, что их радиоактивность намного сильнее, чем этого можно было ждать. Отклонение превышало пределы возможных ошибок очень точного метода измерений. Она сразу же заключила, что причиной избыточной радиоактивности должно быть присутствие в минералах небольшой примеси элемента гораздо более активного, чем уран. А так как среди известных элементов нет более активных, то это должен быть какой-то новый, еще неизвестный элемент.

Здесь супруги Кюри, и, по-видимому, главным образом мадам Кюри, производившая всю систему химических анализов, выработали новый, замечательный по своей целесообразности метод, который и обеспечил им успех. Радиоактивная примесь (радий и полоний) составляла меньше одной миллионной части руды, и все же они ее выделили; потом мадам Кюри получила теми же методами химически чистые соли радия и наконец уже после смерти мужа — чистый металлический радий. Метод Кюри заключался в разделении обрабатываемого материала на две фракции путем воздействия определенных веществ. Измерение их радиоактивности показывало, в какую из этих фракций ушло искомое радиоактивное вещество. Эта фракция подвергалась новой обработке и разделению на две части — и снова находилась фракция, содержащая радиоактивное вещество, и т. д. После каждого нового разделения получались фракции, все более богатые данным радиоэлементом, пока не удалось выделить чистое вещество в виде его соли. Метод Кюри получил с тех пор разнообразные применения.

Радий сделался одним из важнейших элементов научного исследования и получил широкое применение в медицине. В добычу

радия были вложены крупные капиталы, и громадные прибыли потекли в руки ловких капиталистов так же, как это случилось с рентгеновскими лучами. Но супруги Кюри, как и Рентген, ничего не получили за свои открытия. Весь свой опыт они представили всем желающим его использовать.

Как метод получения радиоэлементов был основан на точном измерении их излучения, так эти же измерения, доведенные до высшего предела точности, послужили основой изготовленного мадам Кюри международного эталона радия. Все современные приемы радиоактивных измерений основаны на классических работах мадам Кюри 1911—1912 гг. Мадам Кюри достигла в измерениях скорости радиоактивного распада точности, превышающей все другие измерения, определив 7-й знак. Она даже предложила измерять время по скорости распада, так как эта скорость может быть измерена с громадной точностью и не меняется ни от каких внешних воздействий. С 1903 г. существуют радиоактивные часы Кюри.

С такой же исключительной точностью мадам Кюри стала изучать и непосредственно излучение радиоэлементов. К этому времени она была уже директором большого Радиевого института с физическим и медицинским отделами. Вокруг же образовалась школа, получившая типичные черты научного направления мадам Кюри. Область исследования расширилась: наряду с химией радиоэлементов, с изучением их лучей выросла область молекулярной физики, адсорбции, ядерных спектров и т. п. В центре всего этого движения стояла мадам Кюри. Она направляла каждую из многих десятков работ, ежегодно выходивших из ее института. Ближайшим помощником ее была дочь Ирен Кюри.

В школе мадам Кюри выросли такие талантливые экспериментаторы, как Хольбек, Розенблюм, Ирен Кюри и ее муж Жолио. Для всех них характерны те же черты прекрасно разработанной количественной методики, высшей прецизионности, систематического выделения изучаемого явления, хотя бы по едва заметным его признакам.

Так была найдена небольшая примесь альфа-частиц с большим пробегом среди громадного преобладания однородных частиц малой скорости (работы Ирен Кюри), так были обнаружены нейтроны (Ирен Кюри и Жолио), так ими же было обнаружено образование позитрона и электрона при поглощении светового кванта (фотона) — материализация энергии, как это явление назвала мадам Кюри. Наконец, совсем недавно те же Ирен Кюри и Жолио открыли новый вид радиоактивности, вызванный бомбардировкой атомного ядра, — явление, открывающее новую эру в учении о ядре. Все это — крупнейшие открытия нашего времени. Все они выросли на той методике, которую создали мадам Кюри и ее школа.

Пьер Кюри умер 28 лет назад. Только что умерла и Мария Склодовская-Кюри. Начатое ими 40 лет назад дело изучения ра-

диоактивности росло подобно лавине. На смену им пришли супруги Жолио. Прощедшие школу мадам Кюри, они в новых условиях нашего времени поднялись на такую же высоту, как 40 лет назад супруги Кюри. Научное исследование, которое было религией для мадам Кюри, увлекло и ее дочь, которая так же беззаветно ему предана. Мадам Кюри сумела заразить своим энтузиазмом весь свой институт. Многие сотни научных работ, десятки диссертаций уже вышли из школы мадам Кюри. Несомненно, что влияние ее скажется еще на многих сотнях работ, которые будут созданы ее учениками после ее смерти. Наряду со школами Резерфорда и Лизы Мейтнер школа Склодовской-Кюри определила развитие учения о радиоактивности и атомном ядре, которые сейчас сделались центром всей физической науки.

Статья написана в связи с кончиной Марии Склодовской-Кюри, последовавшей в Париже 4 июля 1934 г., и опубликована в газете «Известия» № 166 от 18 июля 1934 г.

## СУПРУГИ ЖОЛИО

Ирен Кюри и ее муж Фредерик Жолио заняли в современной физике такое же выдающееся место, как 35 лет тому назад Мария Склодовская и ее муж Пьер Кюри, открывшие радий и создавшие учение о радиоактивности. Ирен Кюри и Жолио открыли искусственную радиоактивность, вместе с Чедвиком они участвовали в открытии нейтрона. Но этим далеко не исчерпывается их роль в физике атомного ядра. Изучение позитрона, произведенное Жолио, открытие новых семейств радиоактивных элементов Ирен Кюри дали новый и большой толчок к расширению наших знаний об атомном ядре.

Жолио и Ирен Кюри вышли из школы Марии Кюри. Эта школа — Парижский радиевый институт, который создала и которым до самой смерти в 1934 г. руководила Мария Кюри, — отличалась исключительной тщательностью и строгостью методики, точностью измерений и широким охватом явлений радиоактивности.

Когда 5 лет тому назад начался штурм атомного ядра, во главе соответствующих исследований в институте Кюри стали супруги Жолио. За ними был опыт и прекрасная школа в области радиоактивности, им пришел на помощь талант экспериментатора, но у них не было основных технических орудий, которые имели физики Кембриджской школы и физики Америки, — установок на миллионы вольт и соответственных энергий потоков протонов и дейтонов. Тем не менее, после искусственного расщепления атомов протонами именно Ирен Кюри и Жолио достигли крупнейших успехов, пользуясь старыми, казалось, уже превзойденными средствами радиоактивных лучей.



Здесь нет необходимости в исчерпывающей оценке всех работ супругов Жолио. Напомню только важнейшие результаты последних лет.

На первое место, конечно, нужно поставить открытие искусственной радиоактивности. По своему значению для познания природы и по возможностям практического использования, это — одно из важнейших завоеваний в штурме атомного ядра. В предстоящей менделеевской речи Жолио, несомненно, осветит открывающиеся здесь перспективы, за которые ухватились уже такие учреждения, как «Дженераль электрик» в Америке.

В своем докладе на 1-й всесоюзной ядерной конференции Жолио изложил опыты, произведенные им с Ирен Кюри по расщеплению алюминия альфа-лучами. При этом расщеплении из образовавшегося от столкновения ядра вылетают протоны (ядра водорода), оставляя ядро кремния. Но супруги Жолио подметили, что, кроме того, вылетают нейтроны и позитроны.

Тщательное изучение этого явления показало, что нейтроны и позитроны вылетают не одновременно. В момент попадания частички в ядро алюминия вылетает только нейтрон, позитрон же выбрасывается значительно позже — уже не первоначальным ядром, а тем, которое осталось после потери нейтрона.

Из подсчета ядерной реакции можно было заключить, что это — ядро фосфора с атомным весом 30. Такого фосфора мы не знаем, да он и недолго существует; выбрасывая позитрон, он превращается в кремний. Это — радиоактивный фосфор, или радиофосфор, как его назвали супруги Жолио.

Они тут же показали, что разрушение радиофосфора происходит по тем же законам, как и распад других давно уже известных радиоактивных элементов.

Радиофосфор — это гипотеза, прекрасно объясняющая ход явления. Но существует ли на самом деле в ходе превращения алюминия в кремний промежуточный радиоактивный элемент с химическими свойствами фосфора? Можно ли химически доказать временное существование радиофосфора? Количество радиофосфора ничтожно — не более 10 000 атомов (а в 1 см<sup>3</sup> воздуха мы имеем двадцатизначное число атомов). Задача кажется безнадежной. Но здесь на помощь смелым исследователям пришел их опыт в изучении радиоактивности. Химическая реакция на фосфор показала, что испускание позитронов прекращается вместе с уходом фосфора и в алюминии и кремнии отсутствует. Источник позитронов — действительно элемент, обладающий свойствами фосфора.

С тех пор прошло три года. Искусственная радиоактивность изучается в лабораториях всего мира, в том числе и у нас. Открыто много десятков новых ядер с искусственной радиоактивностью; на очереди уже их практическое применение в биологии, медицине и химии. Всей этой новой отрасли знания мы обязаны супругам Жолио.

Весьма значительна роль супругов Жолио в открытии нейтронов. Боте и Бекер при бомбардировке альфа-лучами некоторых элементов наблюдали появление очень жестких гамма-лучей. Супруги Жолио со свойственной им тонкой наблюдательностью заметили, что, кроме гамма-лучей, здесь имеются какие-то особенные лучи, сочетающие способность проникать сквозь большие толщи вещества со свойством выбивать из сложных органических молекул ядра водорода и сообщать им большие скорости. Именно это сочетание привело Чедвика к мысли, что лучи супругов Жолио — это нейтроны. В изучении свойств нейтронов первые важнейшие данные были получены в работах Жолио.

Позитрон был открыт Бреккетом в Англии, хотя еще до него на отдельные случаи появления позитронов указал Андерсен (США). Еще ранее они наблюдались Скобельцыным. Опыты супругов Жолио дали ясную и количественно точную картину исчезновения позитрона при соединении с электронами (причем испускается два фотона гамма-лучей) и появления позитрона одновременно с электроном (при поглощении гамма-лучей). Эти процессы весьма неудачно называются аннигиляцией и материализацией. Опыты Жолио доказали, что энергетический баланс обоих явлений в точности соответствует теории Дирака и что здесь полностью оправдывается эквивалентность массы и энергии.

Вот три примера той смелой и в то же время осторожной и точной научной работы, которая выдвинула супругов Жолио в первые ряды современных ученых и привела их к Нобелевской премии. Наша Академия наук остановила свой выбор именно на них, когда возник вопрос о первом Менделеевском чтении.

Хорошо известно, каким другом Советского Союза была Мария Кюри, пронесшая свои социалистические убеждения через империалистическую войну и интервенцию. И в этом отношении Ирен Кюри и Фредерик Жолио являются достойными ее преемниками. Оба они принадлежат к лучшим передовым умам современной Франции, с глубокой симпатией относящимся к отечеству мирового пролетариата — Советскому Союзу.

Мы счастливы, что в числе наших верных друзей, наряду с Ланжевеном и Перреном, мы можем назвать и супругов Жолио, как недавно еще могли назвать Марию Склодовскую-Кюри. Дочь ее — Ирен Кюри — руководитель всей научной работы в составе правительства народного фронта Франции.

Мы, советские физики, особенно горячо приветствуем приезд наших товарищей по науке и по борьбе против фашистского мракобесия и с величайшим интересом ждем их докладов и обмена мнениями.

Статья написана в связи с приездом супругов Жолио-Кюри в СССР для участия в работе Менделеевского съезда в Ленинграде и опубликована в газете «Известия» № 223 от 24 сентября 1936 г.

Еще свежа память о живом Алексее Николаевиче, о незабываемом образе этого замечательного человека, и поэтому трудно было бы в спокойных академических тонах говорить о его работе в Академии. Я надеюсь, вы не посетуете на меня, если в моем выступлении будет много личных моментов и личных воспоминаний, часть которых, может быть, и не относится прямо к теме.

Из 29 с лишним лет работы Алексея Николаевича в Академии наук 25 лет мы работали вместе, и, несмотря на то что он был значительно старше меня годами и выше в науке, нас связывали все это время дружеские отношения.

Впервые я встретил А. Н. Крылова на заседании физического отделения Физико-химического общества в Ленинграде; я помню его яркие доклады о физике в морском деле, доклады о цистернах Фрама и их влиянии на качку корабля; помню его замечательный по содержанию доклад памяти В. Л. Кирпичева в этом обществе, помню многочисленные живые выступления по поводу докладов физиков, механиков и математиков. В особенности, конечно, вспоминаются его, как всегда своеобразные, замечания по поводу одного из моих докладов об элементарных электрических зарядах-электронах; он назвал их «комариной плесенью» по сравнению с многотонными объектами корабельной техники.

Алексей Николаевич представил меня и в члены-корреспонденты и в действительные члены Академии наук в 1920 г. И когда сложная процедура этих выборов закончилась положительными результатами, он привел меня к себе. Этот эпизод в своеобразной и остроумной форме Крылов описал в одной из своих статей. С этого времени я по личным воспоминаниям могу говорить о работе Алексея Николаевича в Академии наук.

Надо сказать, что он был избран членом-корреспондентом в 1914 г., а в 1916 г. — действительным членом Академии наук. И сейчас же вслед за этим был назначен директором Главной географической обсерватории. Алексей Николаевич часто вспоминал о формализме, который он застал в этом научном учреждении. Предшественником его был академик Вильд, который, как об этом рассказывал А. Н. Крылов, с русским правительством сносился на французском языке и иногда через швейцарское посольство, так как он был подданным Швейцарии, а печатал труды русской обсерватории и общался со своими сотрудниками на немецком языке.

Но еще больше Алексея Николаевича поразило в этом учреждении состояние науки, которая, в прямую противоположность так хорошо ему знакомым задачам математики, механики и инженерных дисциплин, оказалась расплывчатой и мало обоснованной.

Когда Алексей Николаевич на конкретных примерах убедился в том, что не только метод этой науки, но и сделанные на осно-

ваний этого метода заключения оказываются часто неверными, то потерял всякий интерес к этому делу и отказался от дальнейшего руководства обсерваторией.

В 1917 г. Алексей Николаевич был избран директором Физической лаборатории, в которой развивалось направление, заложенное Б. Б. Голицыным.

Крылов способствовал развитию сейсмологии, принимал деятельное и непосредственное участие в изучении Курской магнитной аномалии, которой руководили академики П. П. Лазарев и И. М. Губкин. По его совету эта экспедиция была снабжена магнитометрами А. Н. де Колонга, которого он очень уважал. Однако геофизика твердой оболочки Земли, как и задачи исследования атмосферы, не увлекала Алексея Николаевича. Алексей Николаевич был математиком, механиком и, прежде всего, кораблестроителем.

Он читал курс приближенных вычислений, который у всех слушателей оставил неизгладимое впечатление. С. П. Тимошенко, по его словам, был настолько под влиянием этого курса, что вся его дальнейшая научная деятельность в большой степени определялась тем, что он прослушал у Алексея Николаевича.

Организованные в то время Оптический и Физико-технический институты в Петрограде сосредоточили внимание на вопросах строения атома, модель которого была построена Бором в 1913 г. В этой работе Алексей Николаевич также принимал живое участие. Ему принадлежит мемуар, как всегда тщательно и подробно разработанный, о проблеме трех тел в применении к модели атома гелия. Насколько я знаю, этот мемуар не напечатан, и в списке трудов Алексея Николаевича я не нашел упоминания о нем. Он, несомненно, имеется в делах Атомной комиссии (как она тогда называлась) при Оптическом институте.

Спустя несколько месяцев после моего избрания в Академию наук Алексей Николаевич привлек меня к рассмотрению вопроса о создании кафедры прикладных наук в системе Академии. 20 октября 1929 г. Алексей Николаевич снова поднял этот вопрос в Академии. Он самым решительным образом возражал против концепции, противопоставлявшей чистую науку практической науке, концепции, ведущей свое происхождение еще от аристотелевской философии и особенно типичной для схоластики средних веков. Безусловно, эта концепция совершенно не оправдывается современным положением науки, и в частности инженерной науки. Алексей Николаевич доказывал, что наука едина, что теоретическая и практическая наука представляют собою нераздельное целое, что они взаимно обуславливают одна другую и помогают одна другой и что для Академии наук было бы чрезвычайно полезно и даже необходимо создать наряду с кафедрами математики, физики и химии, из которых составлялось тогда отделение естественных наук, также и кафедру прикладных наук. Алексей Николаевич говорил, что такое расширение дея-

тельности Академии послужит только для пользы и развития науки и техники: первая будет черпать во второй жизненно важные направления, вторая — применять результаты, достигнутые первой.

Говоря о прикладной математике и о ее значении для техники, Алексей Николаевич более подробно развивает те же мысли. Инициативе Алексея Николаевича Академия обязана тем, что в ее составе имеется большая группа крупных ученых, развивающих в нашей стране технические дисциплины.

Алексей Николаевич утверждал, что теоретическая наука и практические задачи должны находиться в гармоническом единстве. Всю свою жизнь, всю свою деятельность он отдал этой идее. Алексей Николаевич на деле показал, как надо сочетать теорию и практику в жизни и творчестве и какие громадные полезные результаты это дает.

Вообще надо сказать, что Крылов никогда не выступал с советами, которые повисали бы в воздухе.

Алексей Николаевич не раз возвращался к вопросу о том типе математики, которая необходима для инженера, о том, что преподавание математики и механики не должно ставить своей целью загружать инженера большим количеством пенижных для его деятельности знаний, а должно давать ему те сведения, которыми он на самом деле может пользоваться, и научить пользоваться этими знаниями.

В статьях о преподавании математики и механики, которые были опубликованы, А. Н. Крылов во всей широте поставил этот вопрос и довел рассмотрение его до совершенно конкретных выводов о преподавании математики на современном этапе развития техники.

Когда в Академии наук была создана аспирантура, то оказалось, что многие из аспирантов недостаточно подготовлены, и для них был создан подготовительный класс. Однако в аспирантуру по математике часто привлекались люди, которые не имели ни склонностей, ни способностей к математике, и было ясно, что из таких аспирантов творческих ученых не получится.

Алексей Николаевич, которому была поручена подготовка кадров через аспирантуру, в острой, резкой форме выступил в Академии наук и на примерах показал, что важное дело подготовки математике будущих ученых получило неправильное направление. Вообще подготовке инженеров, подготовке ученых Алексей Николаевич всегда придавал принципиальное значение. И в Академии наук мы обязаны Алексею Николаевичу тем, что много предрассудков и ошибок было устранено и что создано более правильное отношение к этому большому и важному вопросу.

В 1921 г. Алексей Николаевич вместе с некоторыми другими учеными был командирован за границу для восстановления научных связей. И здесь деятельная натура его не ограничилась

только беседами с отдельными учеными; сразу же он занялся важными практическими задачами. В частности, ему был поручен подбор судов для перевозки в Советскую Россию особенно необходимых тогда для нас паровозов.

Алексей Николаевич со всей энергией и исключительным знанием корабля и его возможностей из этой, казалось бы, простой задачи транспорта и паровозов сделал и решил крупную научно-техническую проблему. Он нашел совершенно новые способы перевозки паровозов в переработанном виде и такое размещение их на корабле, при котором тот мог перевозить гораздо больше паровозов.

Мне лично пришлось присутствовать при отборе судов, когда Алексей Николаевич вместе с крупнейшими германскими специалистами пароходных компаний рассматривал толстую громадную книгу (регистр) с перечнем судов. Я до сих пор помню, как все эти крупные деятели техники, руководители крупнейших германских фирм «Гамбург—Америка-линия» и других, как студенты в классе большого ученого, профессора, сидели и слушали, что говорил Алексей Николаевич, и тщательно все записывали. Я помню, как по этому регистру, начинавшемуся с парохода «Абердин», Алексей Николаевич сразу же давал все сведения о данных корабля. Например, «Абердин» — корабль 7200 т водоизмещением, находится в Альпарайзо, его остойчивость недостаточна. И по другим показателям он не подходит для организации перевозок». По каждому из следующих кораблей Алексей Николаевич давал почти исчерпывающие сведения, и его высказывания были решающими. Ни один из присутствовавших специалистов не мог ничего добавить или изменить в его характеристике. Впечатление, которое Алексей Николаевич произвел, было потрясающим. Такого знания кораблей никто из них и представить себе не мог.

Во время пребывания Алексея Николаевича в Париже ему было поручено наблюдение за проектом нефтеналивных судов, которые изготовлялись во Франции, и прием этого проекта. И здесь опять мне приходилось не раз наблюдать, как директор кораблестроительной компании, как ученик, выслушивал все замечания Алексея Николаевича и принимал беспрекословно те изменения и исправления, которые он вносил в его проекты. И в конце концов оказывалось, что те же самые суда, по той же цене, которая была установлена договором, могли перевозить на 15% нефти больше, чем предполагалось по первоначальному проекту.

Я помню, с какой тщательностью Алексей Николаевич рассматривал каждую деталь проекта и обязательно находил какие-то пути его улучшения. Я не могу не упомянуть здесь о том исключительном внимании, которое Алексей Николаевич уделял нуждам будущих матросов этих кораблей. Он особенно заботился о том, чтобы каждая каюта и вход в нее были наиболее удобны, обращал внимание на ее внутреннее устройство. Значительные затруднения представляли умывальники. Во Франции краны делаются так, что

вода поступает в самый умывальник, наполняя таз. А мы привыкли к тому, чтобы вода текла струей. Этому, казалось бы, маленькому вопросу Алексей Николаевич уделял большое внимание. Он сам разыскивал подходящие заводы и радовался, когда нашел фирму, которая могла изготовить краны нужного типа.

Алексей Николаевич выполнил и ряд других поручений Академии, в частности содействовал подбору книг для библиотеки Академии наук, много времени и внимания уделял постройке 42-дюймового рефлектора для Симеизской обсерватории.

В своих письмах, адресованных в Академию, он давал подробные оценки и характеристики тем кандидатам, которые выдвигались тогда в академики. В ряде писем, направленных академику-секретарю, Алексей Николаевич высказывал положения, касающиеся жизни Академии наук и особенно ее участия в укреплении мощи нашей Родины.

Алексей Николаевич доказывал, что иметь ученых, работающих по своей специальности на пользу народу, даже и не в стенах Академии, есть прямой долг Академии и что их деятельность не может рассматриваться как постороннее дело чужого ведомства. Эти мысли казались еретическими, потому что для смотревших со «своей колокольни» они были непонятными.

Мы знаем, какую реальную пользу принес Алексей Николаевич своей стране. Правительство высоко оценило эту деятельность, присвоив Алексею Николаевичу высокое звание Героя Социалистического Труда.

Я хочу только кратко остановиться на деятельности Алексея Николаевича в самой Академии, на его научных докладах на заседаниях отделений — сначала Отделения естественных наук, затем в Ассоциации групп физической и математической и потом в Физико-математическом отделении. Вероятно, никто из присутствовавших на этих докладах не забудет четких, тщательно продуманных докладов Алексея Николаевича по самым различным вопросам: о вибрации артиллерийского орудия — эта задача была решена полностью, о показаниях компаса, о качке корабля и т. д.

Никогда не забудутся его замечательные характеристики деятелей науки прошлых эпох и современных ученых: доклады о Ньютоне, Эйлере, Лагранже, а также о С. А. Чаплыгине, Б. Б. Голицыне, Б. Г. Галеркине, Н. Н. Лузине.

За 60 лет своей научной работы, из которых 30 прошло в стенах Академии наук, А. Н. Крылов благодаря своей замечательной памяти накопил громадное количество знаний и фактов. Из этой сокровищницы воспоминаний Алексей Николаевич всегда умел подобрать такие эпизоды, факты или исторические события, которые иллюстрировали его мысли лучше, чем любые длинные рассуждения.

Я хотел бы этим ограничиться. Я думаю, что каждый читал замечательные «Воспоминания» А. Н. Крылова и ряд книг, по-

священных ему, и поэтому не пуждается в подробном перечислении всех фактов его жизни.

Яркий образ Алексея Николаевича навсегда останется в памяти всех, кто его знал. Имя его дорого каждому русскому ученому и никогда не будет забыто кораблестроителями и моряками всего мира. Тем, кто знал его лично, нельзя забыть эту исключительную личность, в которой сочетались чрезвычайная доброжелательность ко всем и в то же время непримиримость, прямота и резкость суждений — с мягкостью, юмор — с серьезным и тщательным изучением каждой стоявшей перед ним проблемы.

Высокое чувство долга и преданность своему народу, присущие А. Н. Крылову, никогда не изгладятся из памяти тех, кто имел счастье его видеть и знать.

Жизнь и творчество Алексея Николаевича навсегда войдут в историю науки, в историю нашей страны.

Статья представляет собой стенограмму речи, произнесенной 15 декабря 1945 г. на совместном заседании Академии наук СССР и Народного комиссариата Военно-Морского Флота, посвященном памяти А. Н. Крылова. Она опубликована в Трудах инст. истории естеств. и техн., 15, с. 6—12, 1956.

## ЯКОВ ИЛЬИЧ ФРЕНКЕЛЬ

23 января 1952 г. в возрасте 58 лет умер Яков Ильич Френкель. Советская физика потеряла одного из крупнейших своих деятелей, многие идеи которого вошли в основной фонд нашей науки. Область научных интересов Якова Ильича поразительно широка. Она простиралась от математики через все разделы физики вплоть до ядерной физики, геофизики, физиологии и техники.

Яков Ильич не довольствовался кафедрой теоретической физики, которую он возглавлял в Ленинградском политехническом институте. Он имел учеников и консультировал на местах: в Свердловске и в Риге, в Ростове и Одессе, в Казани и Харькове. Своими научными идеями он делился не только во всех физических институтах и университетах Советского Союза, но и в Главной геофизической обсерватории, в Институте авиационных материалов, в отраслевых электротехнических и радиотехнических институтах. Яков Ильич был инициатором развития научного и учебного кино, был председателем Совета Дома ученых в Лесном, где давал систематические консультации, читал большое число популярных лекций во всевозможных организациях.

Наконец, нельзя не вспомнить о его деятельной помощи всем, кто к нему обращался, или кому он считал нужным помочь. Необычайная доброта, любовь и уважение ко всякому, в ком Яков Ильич мог предположить добрые побуждения и стремление к знанию, были органически присущи светлой личности Якова Ильича.



Яков Ильич вначале не знал философии диалектического материализма и долго не понимал ее значения для науки. Но изучив ее и поняв ее решающую роль для научного творчества, он не пожалел сил на перестройку всего научного мировоззрения. Поняв свои ошибки, Яков Ильич их открыто признал и пытался построить последовательную материалистическую теорию частиц и поля.

Чтобы оценить место Якова Ильича Френкеля в современной физике, лучше вспомнить те его идеи, в которых он живет и сейчас. В области ядерной физики — капельная модель ядра с его электрокапиллярными колебаниями, приводящими к делению; понятие о температуре и термодинамике атомных ядер; понятие об испарении нуклонов и о ширине энергетических уровней, о самопроизвольном делении ядер урана. В физике твердых и жидких тел — представления о зарождении и перемещении дырок, об их роли в тепловом движении, в механизме диффузии и адсорбции, идеи о механизме дислокаций в кристалле, наконец идеи об общности теплового движения в жидкостях, а также самой их структуры с твердым теплом вместо общепринятого рассмотрения жидкости как сжатого газа. Все это далеко не полный перечень идей, внесенных в физическую науку Я. И. Френкелем.

Трудно перечислить отдельные результаты, к которым пришел Я. И. Френкель при развитии им теории жидкого и аморфного состояний вещества.

Большое влияние на развитие оптики твердого тела имела и будет еще иметь теория экситонов, созданная и тщательно разработанная Френкелем в 1931 г. Роль этой теории растет по мере того, как раскрываются все новые и новые факты, находящие объяснение в теории экситонов.

Теория твердых ионных и электронных проводников обязана Френкелю многими основными идеями: «дефекты по Френкелю» не сходят со страниц любого описания этих явлений.

Первая квантовая теория металлов была создана еще в 1924—1927 гг. Яковом Ильичом. Она сводилась к утверждению, что в металле электроны находятся в квантовых состояниях и постоянно обмениваются местами с соседними. Появившаяся вскоре теория Зоммерфельда, применившего к электронному газу в металле статистику Ферми, своей простотой на некоторое время заслонила физически более глубокую теорию Френкеля. И только сейчас мы начинаем понимать плодотворность картины, развитой последним.

Идея об электрическом двойном слое на поверхности металла, высказанная Яковом Ильичом еще в 1916 г., и сегодня сохранила свое значение. Ему же принадлежит мысль о роли квантовой энергии электронов в определении сил сцепления и постоянной решетки металла.

Теория вращающегося электрона, его магнитного момента и массы, и теория электрического момента движущегося электрона.

обладающего магнитным моментом, были опубликованы Френкелем за несколько лет до появления теории Дирака и уравнений Прока.

Я. И. Френкелю также принадлежит приоритет идеи об обменном взаимодействии как причине ферромагнетизма. А в последние годы Яков Ильич развивал новое понимание квантовой механики как теории квантового поля.

Большое значение получили работы Якова Ильича по ориентационным колебаниям как в кристаллах, так и в полимерных цепочках. Они привели к открытию и правильному пониманию ориентационного плавления и аномалии теплоемкости в кристаллах и к теории некоторых спектров комбинационного рассеяния.

Больше чем на десять лет предупредил Френкель теорию волн дислокации как основы пластичности кристаллов.

К теории электрического поля в атмосфере Яков Ильич возвращался несколько раз. Основная мысль об электростатической индукции, вызванной облаками с зарядами, разделенными земным тяготением, — оставалась неизменной. Недавно, в 1949 г., Якову Ильичу удалось в отдельной монографии дать цельную теорию атмосферного электричества.

Яков Ильич опубликовал больше систематических курсов и учебников, чем кто-либо. И здесь он не ограничивался изложением общепринятых основ науки, но широким потоком вносил свои смелые мысли, свои аналогии, поясняющие сложные теоретические выводы. По этим учебникам учились физике тысячи советских студентов и ученых. К Якову Ильичу приезжали учиться физике из многих республик и городов Советского Союза.

Более 200 печатных работ, десятки курсов, учебников и монографий оставил после себя Яков Ильич Френкель. Он не боялся посылать в печать свои труды, как только приходил к заключению, что они правильно отражают свойства изучаемого явления. Не все его статьи выдержали испытание временем.

Наряду с весьма плодотворными идеями, глубоко продуманными, Яков Ильич высказывал и опубликовывал более сырые. Высказывая в основном правильную мысль, Яков Ильич часто выходил за рамки твердо установленных фактов и давал повод для резкой критики ее деталей. Эти детали исправлялись, картина уточнялась и подробно разрабатывалась иногда самим Френкелем, иногда же его более осторожными последователями. При этом часто незаслуженно забывали того, кто дал жизнь новой идее.

Оценивая научное наследие Якова Ильича, нельзя забывать, что он не только выдвинул ряд основных представлений и идей современной физики, но и привлек к научной деятельности сотни молодых сил. В истории культуры первых десятилетий Советской власти Яков Ильич Френкель занял большое место, достойное нашей великой эпохи.

Еще в первые революционные годы Яков Ильич читал лекции в Крымском университете и принимал участие в работе Комиссариата просвещения. Он был заключен в тюрьму при захвате Крыма контрреволюцией и освобожден в 1921 г. с восстановлением Советской власти. Всю свою сознательную жизнь Яков Ильич был горячим патриотом социалистической родины.

Искренний и честный, верный товарищ и друг, всегда живо увлеченный всем передовым, прогрессивным в науке и жизни, Яков Ильич прошел свою жизнь, окруженный любовью всех, его знавших.

Я. И. Френкель был награжден орденом Трудового Красного Знамени, был удостоен Государственной премии первой степени и был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. Он заведовал теоретическим отделом Физико-технического института и кафедрой Политехнического института и состоял членом Ученого совета ряда отраслевых институтов.

Статья-некролог опубликована в ЖТФ, 22, 1905—1907, 1952. О Я. И. Френкеле см. также статью А. Ф. Иоффе «О научном наследии Я. И. Френкеля», включенную в кн.: 1) Я. И. Френкель. Собрание избранных трудов, т. II. М.—Л., 1958, с. 17, 18 и 2) Я. И. Френкель. Кинетическая теория жидкостей. Л., 1975, с. 577—579.

## ПЬЕР КЮРИ

Пьер Кюри родился почти 100 лет назад — в 1859 г. и прожил всего 47 лет. В 1906 г., едва получив благоприятные условия для научной работы, он погиб в результате несчастного случая на улице. Несмотря на короткий период своей исследовательской деятельности, большую педагогическую нагрузку и отсутствие приспособленной для научных изысканий лаборатории, Кюри оставил большое научное наследие непреходящего значения. Его труды, собранные в одном томе, занимают 600 страниц. Но сколько здесь классических результатов, навсегда вошедших в науку, и не только в физическую! Если пользоваться современной классификацией, то можно сказать, что работы Кюри обогатили и кристаллографию, и физику, и ядерную физику и медицину (если не биологию в целом). Замечателен вклад Кюри в развитие методики точных знаний, в теорию и практику измерительных приборов.

При всей широте своих интересов Кюри был прежде всего физиком-новатором. Не случайно, а под влиянием непреодолимого стремления искать новое и даже неожиданное, Кюри делал свои открытия. Он непрерывно спрашивал природу: так ли обстоит дело, как мы привыкли думать, что происходит в действительности? — и не испытывал разочарования, если опыт лишь подтверждал уже известное. Пьер Кюри стремился понять общие закономерности явлений природы, а не увеличивать число своих

научных трудов, из которых многие так и не увидели света. Поразительна была его интуиция, опережавшая взгляды современников. Приведу примеры этого.

Жак Кюри — брат Пьера — видимо, при ближайшем его участии опубликовал в 1888 г. докторскую диссертацию об электрических свойствах изолирующих кристаллов. Тогда, да и долгое время спустя, принято было считать, что затухающие по времени токи в этих кристаллах — результат медленно устанавливающейся диэлектрической поляризации. Пьер Кюри, выступив на заседании Физического общества, дал совершенно иное толкование, согласно которому токи создавались движением ионов, а затухание тока — накоплением объемных зарядов. Спустя 15 лет взгляды Пьера Кюри получили полное подтверждение в опытах, проведенных мною вместе с Рентгеном.

Другой пример. Открытие явления радиоактивности рассматривалось всеми учеными как важный шаг вперед в познании мира и как новое лечебное средство. Далеко еще было до атомной бомбы! А Пьер Кюри уже в 1903 г. в речи, произнесенной в связи с присуждением ему Нобелевской премии, сказал: «Не трудно предвидеть, что в преступных руках радий может сделаться крайне опасным... Но все же новые открытия в конечном счете приносят человечеству больше пользы, чем вреда».

И еще: в конце XIX в. среди ученых было принято считать атомное строение вещества лишь удобной рабочей гипотезой, но она отвергалась как отражение реального строения вещества. Хорошо известно, что только в результате открытий, сделанных на рубеже нашего столетия и в первые его годы (рентгеновы лучи, электроны, радиоактивность, открытие дифракции рентгеновых лучей), атомы стали реальностью в сознании физиков. Кюри же признавал атомное строение вещества и пытался доказать его анализом симметрии кристаллов, которая сводится к атомной их структуре.

Если попытаться охарактеризовать Кюри как физика, то необходимо отметить, наряду с новаторством, глубоким анализом основ науки и наблюдательностью, также и его исключительно строгую требовательность к выводам из своих опытов и связанное с этим внимание к методике эксперимента.

Все это, разумеется, лишь методы научной работы; успех ее объясняется громадным талантом, которым Пьер Кюри обладал, как немногие ученые, чьи имена сохранились в истории.

Лучшей характеристикой ученого служат его труды. Вспомним же, чем обязана Пьеру Кюри современная физика.

Первая работа 20-летнего юноши Кюри была посвящена инфракрасным лучам, или тепловым волнам, как их тогда называли. Устроив дифракционную решетку из тонких проволок с периодом в  $1/4$  мм, Кюри определял с ее помощью длины волн; распределение же интенсивности по спектру давала призма из каменной соли, позволявшая измерять самые слабые линии.

Вопросы спектроскопии, видимо, мало интересовали молодого Кюри. Его мысли занимала проблема симметрии в строении вещества, с одной стороны, и свойства симметрии физических явлений, с другой.

В 1880 г. Пьер Кюри и его брат — кристаллограф — сообщают об открытии ими пьезоэлектричества, которое Пьер рассматривает как обобщение и дальнейшее развитие известных уже пьезоэлектрических свойств турмалина. Оба явления вызваны изменением размеров кристалла. Сжимается ли турмалин под влиянием внешнего давления или охлаждения, на его гранях появляются такие же заряды; нагрев и растяжение производят противоположное действие. Через две недели братья Кюри докладывают Академии о своих исследованиях пьезоэлектрических свойств большой серии кристаллов, среди которых мы находим, наряду с турмалином, кварц и сегнетову соль. Еще через полгода формулируются количественные законы пьезоэлектричества и обсуждаются вытекающие отсюда выводы, важные для исследования вопроса об атомной или сплошной теории строения вещества.

Пьер Кюри еще не раз возвращался к этой проблеме. В свойствах симметрии кристаллической среды он видит проявление ее молекулярного строения и пытается придать этой связи характер убедительного доказательства. До тех пор, пока это ему не удалось, он рассматривает каждое явление с точки зрения как атомного, так и непрерывного заполнения пространства, и объективно противопоставляет друг другу выводы из обоих представлений.

Проходит еще год, и братья Кюри сообщают об открытии ими явления, обратного пьезоэлектричеству, а именно — электрической деформации пьезоэлектрических кристаллов. На протяжении ближайшего года устанавливаются количественные законы нового явления и их связь с количественными характеристиками пьезоэлектрических свойств тех же кристаллов.

Позже, в 1889 г., братья Кюри публикуют полученные ими еще в 1881 г. данные опытов и их детальное описание. Здесь излагается целая серия новых методов, при помощи которых Пьеру Кюри удалось с большой точностью измерить ничтожные по величине деформации кварца. Описываются основанные на пьезоэлектричестве приборы для измерения количества электричества: две склеенные кварцевые пластинки с противоположным направлением электрических осей. Изгиб их при электризации отклоняет связанную с ними стрелку, снабженную микрометрической шкалой. В связи с изучением электризации Кюри разрабатывает усовершенствованный квадрантный электромметр, абсолютный конденсатор и ряд других приборов, которые он даже не считал нужным описать.

Еще много лет спустя после смерти Пьера Кюри большое значение имел его прибор для измерения количества электричества при помощи пьезоэлектрического кварца, состоявший из

тонкой пластинки, вырезанной перпендикулярно к электрической оси и подвешенной вдоль главной оси кристалла. После того как пьезоэлектрическая постоянная была с большой точностью измерена, можно было определить выделяющийся на поверхности кварца заряд по величине навески на подвешенной к пластинке чашке.

Этим прибором пользовались в лаборатории Марии Кюри еще в 30-х годах, когда я там бывал. И, надо сказать, для измерения количества электричества это — великолепный прибор, простой и точный.

С пьезокварцем Кюри у меня связано воспоминание о первой научной работе. Мне было предложено выяснить: что является причиной упругого последействия — деформация или напряжение, вызывающее деформацию. Разделить их, казалось, можно было при помощи пьезокварца. Напряжение, определяемое подвешенным грузом, остается неизменным; если деформация будет продолжать расти, она создаст дополнительный заряд на электродах. В ходе этого исследования пришлось наблюдать упругое последействие при изгибе пластинки Кюри. Я приписал его пьезоэлектрическим зарядам, заполняющим в этом случае весь объем кристалла. Чтобы устранить появление зарядов при изгибе, следовало вырезать пластинку в другом кристаллографическом направлении.

Об этом я написал Пьеру Кюри и просил его, если он признает мои соображения правильными, передать мастерской заказ на такую пластинку. Вскоре я получил ответ, подтверждающий мои соображения, а вслед за этим и саму пластинку, с помощью которой установил отсутствие истинного упругого последействия в кварце.

Другое воспоминание, связанное с Пьером Кюри, относится к самому началу моей работы у Рентгена. Это было в конце марта 1903 г. Рентген вызвал меня и сообщил, что появилась статья Кюри, в которой говорится о больших количествах тепла, непрерывно выделяемых радием. «Я бы не поверил этому, — сказал Рентген, — ведь так много появляется сенсационных сообщений, которые не оправдываются, но ведь Пьер Кюри — один из лучших экспериментаторов нашего времени и человек осторожный. Результат слишком важный и необычный — необходимо его проверить. Вот ампула, содержащая 63 мг радия, — посмотрите, сколько она выделяет тепла».

Спустя короткое время я уже докладывал на семинаре статью Резерфорда, который, исходя из обнаруженного Кюри выделения тепла, высказал мысль о распаде атомов и их превращениях.

Впечатление, которое произвела заметка Кюри, было исключительно велико. Вспоминается посвященный ему некролог, в котором предсказывалось, что будущее человечество примет за начало своей эры открытие Пьером Кюри в марте 1903 г. теплоты, выделяемой радием.

Однако вернемся к научной жизни Кюри в 80-е годы — годы открытия пьезоэлектричества. Он не успел еще опубликовать полностью своих исследований, как появилась обобщающая работа Фогта, посвященная пьезоэлектричеству, и монография Кюри не была написана. Позднее Кюри хотел восполнить этот пробел в курсе своих лекций и приступил к изложению вопроса о пьезоэлектричестве, но смерть не дала закончить этого близкого ему дела.

Для Пьера Кюри законы пьезоэлектричества тесно переплетались с основной для него проблемой — симметрией. Он обобщил и дополнил учение об элементах симметрии и сформулировал положение о том, что как наличие симметрии, так и ее отсутствие в любом явлении могут быть объяснены только такими же свойствами причин, которые вызывают это явление. Глубокий анализ он посвятил вопросу о взаимосвязи элементов симметрии среды, где протекает явление, и свойствам симметрии самого явления. В частности Кюри подробно исследовал симметрию электрического и магнитного полей. В кристаллах он видел не только их ограничение, но прежде всего анизотропную среду, вызванную соответствующим расположением образующих ее молекул.

Впрочем, и проблеме внешней формы кристалла Кюри отдал немало времени и труда. Он тщательно изучал рост и растворение отдельных граней, открыл закон, связывающий скорость роста грани с величиной ее поверхностной энергии и плотностью расположения в ней молекул.

Знакомясь с этим циклом работ Кюри, видишь в нем кристаллографа, владеющего всем богатством накопленного опыта и творчески его развивающего. Кристаллографические законы Кюри представляются столь же фундаментальными, как и его законы в области пьезоэлектричества, магнетизма и радиоактивности.

Замечательны работы Кюри по кристаллографии, по пьезоэлектричеству, но еще больше поражает его труд, посвященный магнетизму. Каждый следующий шаг Кюри был крупнее предыдущего и подымал его как ученого на большую высоту. Так было и дальше, когда он принял участие в исследованиях по радиоактивности.

Работа Кюри по магнетизму стала его докторской диссертацией; она была напечатана в 1895 г. Исследовав 20 различных материалов — диамагнитных, парамагнитных и ферромагнитных — в широком интервале температур (до  $1400^{\circ}$ ), Кюри дал исчерпывающее описание их свойств. Он установил «закон Кюри» для парамагнитных веществ, согласно которому парамагнитная восприимчивость обратно пропорциональна абсолютной температуре. Он показал независимость диамагнитной восприимчивости от температуры. Позднее его ученик — П. Ланжевен — создал теорию, объяснившую результаты Кюри.

Исследование ферромагнитных материалов привело Пьера Кюри к установлению «точки Кюри» — момента, когда ферромагнитные свойства переходят в парамагнитные. «Точка Кюри» сделалась с тех пор понятием, далеко выходящим за рамки магнетизма.

Кюри правильно заключил из своих опытов, что физическая природа диамагнетизма и парамагнетизма совершенно различна, тогда как природа парамагнетизма близка ферромагнетизму.

Трудно передать в краткой статье хотя бы важнейшие результаты магнитных исследований Кюри, своеобразии различных изученных им материалов, влияние давления, температуры, агрегатного состояния. Переход парамагнитного состояния в ферромагнитное напоминал ему процесс конденсации. Недаром он одновременно проанализировал уравнение Ван-дер-Ваальса, в котором нашел много общих черт с закономерностями, обнаруженными им в магнитных свойствах. На 100 страницах работы по магнетизму Кюри сумел изложить такое богатство фактов и выводов из них, для которого потребовался бы толстый том.

Разумеется, и здесь не обошлось без разработки новой методики и новых приборов, обеспечивших большую точность, которую сам Кюри оценил в 1—2%, при крайней малости измеряемых воздействий.

Идеи симметрии Кюри распространил и на явления магнетизма. Не ограничиваясь наблюдениями, он спрашивал себя: возможно ли существование свободного магнетизма и каковы были бы его свойства симметрии? На этот вопрос ему пришлось дать отрицательный ответ.

Руководствуясь, видимо, такими же соображениями симметрии, Кюри настойчиво искал аналога ферромагнетизму среди диамагнетиков и не нашел его. Но не привела ли открытая через 5 лет после смерти Кюри сверхпроводимость к сверхдиамагнетизму, о котором он мечтал, к полному вытеснению магнитного поля? Можно пожалеть, что в то время было неизвестно явление антиферромагнетизма; оно дополнило бы картину магнитных свойств, которую обрисовал Кюри. Антиферромагнетизм, пожалуй, единственное, что внесла наука в эту область за 60 лет, прошедших после опубликования труда Кюри.

Последний период деятельности Пьера Кюри — после 1895 г., когда он вместе с Марией Склодовской-Кюри приступил к исследованию радиоактивности, — известен лучше. В их содружестве трудно выделить долю каждого в отдельности. Несомненно, что соединению их талантов человечество обязано открытием радия и полония, анализом радиоактивных излучений альфа- и бета-лучей, установлением переноса заряда бета-лучами. Пьер Кюри обнаружил и тщательно изучил явление наведенной активности, выделение эманации.

Выше уже упоминалось об открытии Пьером Кюри теплоты, выделяемой радием. В первой же его краткой заметке правильно



оценивается количество тепла, выделяемого одним грамм-атомом радия, и вытекающие из этого факта выводы. Однако, наряду с гипотезой об освобождении внутриатомной энергии при превращении элементов, он считал необходимым сначала уточнить — не поглощает ли радий энергию какого-то неизвестного еще вида из окружающего пространства. Как мы знаем, энергия, освобождаемая радием, — результат его распада на альфа-частицу и эманацию. Но неизвестный тогда источник энергии — космические лучи — существовал и также вызывал внутриядерные превращения, хотя и иного порядка величины по сравнению с самопроизвольным распадом радия.

Чтобы правильно оценить Пьера Кюри как одного из самых выдающихся физиков-экспериментаторов, необходимо учесть не только замечательные результаты, полученные им в каждой области знания, которой он посвящал свое внимание, но и те условия, в которых протекала его научная деятельность. Без специально оборудованной лаборатории, в уголке под лестницей, среди студенческого практикума, в сарае, при помощи самодельных приборов, Кюри делал одно открытие за другим, проводил самые тонкие прецизионные исследования.

Даже получение Нобелевской премии, присужденной ему совместно с Марией Кюри и Беккерелем, не внесло решающего перелома в условия работы. После преодоления многочисленных препятствий Кюри получил небольшую лабораторию и необходимые средства на ее оборудование. Нелепая смерть оборвала его деятельность в период ее расцвета.

Дело Пьера Кюри продолжали его друзья и ученики. Под руководством Марии Кюри вырос и получил мировую известность Институт радия, где было выполнено свыше 500 исследований по радиоактивности. Его ученик — Поль Ланжевен — на основе результатов, полученных Пьером Кюри, и в полном согласии с ними создал теорию магнетизма, а открытие пьезоэлектричества использовал для получения и приема ультразвука в морской воде. Кристаллографические идеи Кюри также нашли продолжателей, в том числе в лице русского ученого Ю. В. Вульфа.

Из биографических данных о Пьере Кюри следует указать, что он получил домашнее образование и никогда не посещал школы. Отец его — врач со склонностью к научной деятельности — видимо, рано понял своеобразие дарований своего сына и выбрал для него преподавателя, которого не раз вспоминал с благодарностью Кюри-ученый.

Сразу же после сдачи экзаменов за среднюю школу Пьер Кюри стал препаратором в лаборатории Дезена, где и выполнил свою первую научную работу. Еще до этого он несколько лет помогал в лабораторной работе своему старшему брату Жаку, с которым его связывала трогательная дружба. Вместе с ним Пьер проводил исследования в области кристаллографии, пьезоэлектричества и электрических свойств изолирующих кристаллов. В дли-

тельных беседах с ним выработалось научное мировоззрение Пьера Кюри, в котором проблема симметрии заняла такое большое место. Здесь же вырос интерес к кристаллам и накопились глубокие знания их свойств.

Если первая половина короткой по времени, но богатой содержанием научной деятельности Пьера Кюри была тесно связана с Жаком — его братом и другом, то вторая половина, начиная с 1895 г., протекала в совместной работе с его женой и другом Марией Склодовской-Кюри. Последней принадлежит лучшая биография Пьера Кюри, дважды изданная в СССР. Ею же написано предисловие к собранию его трудов, изданному в 1908 г. Французским физическим обществом.

Вспоминая блестящую научную деятельность Пьера Кюри, нельзя забыть о его личности, о его высокой принципиальности и передовых убеждениях. Он решительно отклонял все виды наград и почестей, которые ему предлагали, с отвращением говорил о французском обычае добиваться научных должностей путем посещения кандидатами влиятельных лиц. Нобелевскую премию он с женой истратил на организацию лечения радиом. Кюри не знал компромиссов, был правдив до конца не только в науке, но и в жизни.

В политических вопросах, по отношению к религии Пьер Кюри был одним из наиболее прогрессивных людей своего времени. Его демократические убеждения, полное отсутствие национального шовинизма, сочувствие угнетенным народам и ненависть к угнетателям, так же как и его научные идеи, разделялись и развивались его женой — другом Советского Союза, его учеником Полем Ланжевром, вступившим во Французскую коммунистическую партию.

Его дочь Ирен, также отдавшая свою жизнь науке, и ее муж Фредерик Жолио-Кюри, стоящий во главе движения за мир во всем мире, еще выше развили эту семейную традицию, начатую еще отцом Пьера Кюри — врачом, который лечил коммунаров и был близок им по духу.

50 лет прошло со дня смерти Пьера Кюри. Пройдут еще столетия, но память о Кюри-ученом, о Кюри-учителе не изгладится в истории науки. Основоположник учения о магнетизме, радиоактивности, ядерной энергетике, автор ведущих идей о симметрии в природе, открывший взаимосвязь деформаций и электризации кристаллов, Пьер Кюри останется яркой фигурой в физике конца XIX—начала XX в.

Статья опубликована в журнале «Вестник Академии наук СССР», 4, 30, 1956 (см. также: Природа, 5, 74, 1956, «Ленинградская Правда» от 4 апреля 1956 г. и «Известия» от 19 апреля 1956 г.).

О Пьере Кюри см. кн.: Мария Кюри. Пьер Кюри, выдержавшую в Советском Союзе три издания (1924, 1959 и 1968 гг.). См. также: Пьер Кюри. Избранные труды. «Классики науки», М., 1966. В этой книге имеется подробный биографический материал, составленный Н. Н. Андреевым и Л. С. Сазоновым.

## ДОПОЛНЕНИЕ К «ВОСПОМИНАНИЯМ О ПРОФЕССОРЕ П. ЭРЕНФЕСТЕ» Г. Е. ЮЛЕНБЕКА

Павел Сигизмундович Эренфест оказал большое влияние не только на физиков Голландии, где он после Лоренца занимал кафедру теоретической физики, но и на развитие советской физики. То обстоятельство, что он занял по настоянию самого Лоренца его кафедру, составило впоследствии трагедию его жизни. Он считал себя недостойным такого высокого положения и думал, что узурпировал место более достойного, всякий раз, когда на это место выдвигался один из его учеников. Настойчиво он искал выхода, пытался, например, получить кафедру в одном из институтов Сибири или Урала. Для Ленинграда, Москвы и Киева он видел физиков, которых считал много выше себя, в частности Л. Д. Ландау. Эренфест погиб в год, когда Гитлер захватил власть в Германии.

А между тем именно во времена Эренфеста Лейден сделался мировым центром теоретической физики, куда приезжали поучиться или побеседовать с Эренфестом все лучшие физики. Во втором этаже его дома была комната, на белой стене которой оставляли свои подписи те, кто в ней жил. Здесь были и Эйнштейн, и Бор, и немцы, и американцы, и англичане, и конечно, русские, которые особенно были близки сердцу Павла Сигизмундовича.

Несколько лет Павел Сигизмундович жил в Петербурге, одним из первых после 20-летнего перерыва сдал магистерский экзамен, но к чтению лекций в университете не был допущен. Только Политехнический институт — тогда самый передовой — решился предоставить ему возможность чтения необязательного курса дифференциальных уравнений физики. И что это был за курс! Ни в одном изложении этого классического предмета физика с математикой не сочетались в такое гармоническое целое.

Помню, когда во время своих магистерских экзаменов я высказал академику Стеклову некоторые из обобщений Эренфеста, сославшись на него, это произвело сильное впечатление и, думаю, надолго определило мнение Стеклова о моей математической эрудиции.

Еще больше давали семинары, происходившие под руководством или даже только при участии Эренфеста, или беседы с ним. Юленбек это убедительно показал.

Я помню семинар в Лейдене, где тот же Юленбек — тогда еще начинающий физик — изложил гипотезу о вращающемся электроне и о «спине» как четвертой координате в схеме Паули. Можно с уверенностью сказать, что для самих докладчиков (Гаудсмита и Юленбека) физический смысл их гипотезы полностью выяснился лишь в ходе дискуссии, в результате вопросов и ответов Эренфеста.

Лично для меня общение с Эрэнфестом имело громадное значение. За все годы его пребывания в Петербурге он ежедневно в письмах излагал свои мысли, а дважды в неделю мы обсуждали их вместе с другими физическими вопросами у него на квартире. Эти письма и сейчас хранятся у меня.

Это были дореволюционные годы. Многие нас возмущало в системе научной работы. В частности, постановка магистерских экзаменов, которая на несколько лет отрывала от активной научной работы и все же оказывалась непреодолимой для таких физиков, как В. К. Лебединский, А. А. Гершун, В. Ф. Миткевич. Я помню выступление Эрэнфеста на съезде естествоиспытателей в Москве, когда он, рассказав, как поставлены магистерские экзамены в Петербурге и как Д. С. Рождественский, оставив научные исследования и отказавшись от участия в съезде, насыщается бесполезными знаниями, не выдержал и расплакался.

Эрэнфест жил интересами русской науки, любил ее и уважал, что он доказал позже, став после революции и блокады России связующим звеном молодой советской физики с Западом.

С благодарностью вспоминаю, сколько энергии вложил Эрэнфест для обеспечения научных командировок нынешних академиков В. А. Фока и Д. В. Скобельцына.

В краткой заметке трудно рассказать о значении и своеобразии вклада Эрэнфеста в развитие физики.

Мы обязаны ему физическим пониманием  $H$ -теоремы Больцмана (учителя Эрэнфеста), квантовой гипотезы Планка, закона смещения Вина и его обобщения в адиабатических инвариантах, механизма термоэлектродвижущих сил и многих других принципиальных основ современной физики. До сих пор лучшим изложением статистической физики является статья в Энциклопедии математических наук, написанная П. С. Эрэнфестом вместе с его женой Татьяной Алексеевной Афанасьевой-Эрэнфест.

В лице Павла Сигизмундовича физика потеряла один из самых светлых умов; он умел в каждом физическом вопросе показать его суть, умел видеть в физике не разрозненные факты, а цельную взаимосвязанную картину захватывающей красоты и стройности. Это был верный друг советской науки, друг и учитель многих советских физиков.

По всему миру рассеяны ученые, обязанные Эрэнфесту своим интересом к проблемам физики. Закончу тем, с чего начал: Эрэнфест оказал колоссальное влияние на развитие физики не только чисто научной деятельностью, т. е. своими печатными трудами и т. д., но и личным влиянием.

Статья написана по просьбе редакции журнала «Успехи физических наук» в качестве дополнения к опубликованной на страницах этого журнала статье проф. Г. Е. Юленбека. В основе статьи Юленбека лежала его речь, произнесенная при награждении его медалью Эрстеда за заслуги в преподавании физики и практически полностью посвященная П. С. Эрэнфесту, который был его учителем в Лейдене. «Дополнения» А. Ф. Иоффе

опубликованы в том же выпуске, что и статья Юленбека (62, 371—372, 1957). П. С. Эренфесту посвящена также специальная глава в кн.: А. Ф. Иоффе. Встречи с физиками. М., 1960.

## МАКС ПЛАНК

В 1947 г. в возрасте 89 лет умер Макс Планк. Открытие им квантовых свойств световых явлений создало новую эру в физике и химии, привело к радикальной их перестройке.

На грани XIX и XX вв. произошел ряд событий, определивших дальнейшую судьбу физики. Они совпали с началом научной деятельности Планка в 80-х годах XIX в. Вскоре после этого были открыты радиоволны Герца, еще через семь лет — лучи Рентгена, затем — электрон Томсона и наконец Беккеремм и супругами Кюри была открыта радиоактивность. Первое десятилетие XX в. отмечено окончательной победой атомных теорий и теории относительности. Во второе десятилетие исследованы атом Бора и структура кристаллов. Центром этой научной бури были кванты и относительность. Если можно связывать целую научную эпоху с отдельными именами, то это была эпоха, выросшая вокруг Планка и Эйнштейна, как ее первооткрывателей.

Научные результаты неотделимы от личности их автора. Поэтому небезынтересно вспомнить не только то, что сделал Планк и к чему привели результаты его деятельности, но и то, как он сам пережил вызванный им перелом в физике. Мне пришлось часто встречаться и беседовать с Планком, и о своих впечатлениях я попытаюсь рассказать.

Некоторое представление о том, как понимали задачи и роль теоретической физики современники Планка, дает следующий эпизод, рассказанный Планком однажды в Берлине на банкете, данном в его честь Физическим обществом.

В ответ на ряд приветствий Планк рассказал об истории своей научной карьеры. Представив и защитив в Мюнхене работу на звание доцента, он направился к заведующему кафедрой физики Жолли и сообщил о своем намерении посвятить себя развитию теоретической физики. На это Жолли сказал: «Молодой человек, зачем Вы хотите испортить себе жизнь, ведь теоретическая физика уже в основном закончена, дифференциальные уравнения решены, остается рассмотреть отдельные частные случаи с измененными граничными и начальными условиями. Стоит ли браться за такое бесперспективное дело?»

В свете бурного развития теоретической физики последующих десятилетий эти слова звучат как анекдот, но они отражают определенные эпохи, которые повторяются. Такие же слова я слышал из уст выдающихся физиков в эпоху расцвета квантовой теории, когда казалось, что теоретическая основа физики дана в общих положениях квантовой механики. Но вслед за этим последовало открытие нейтронов и ядерной физики с ее все еще неразрешен-

ными проблемами. Диалектический материализм не допускает таких прогнозов. Планк не испугался тогда предостережений и пошел своей дорогой широких обобщений термодинамики. Он сумел развить ее содержание, подчеркивая особое место тепловых явлений, но отказываясь сначала от статистических теорий. Пытаясь вывести спектр абсолютно черного излучения из общей формы связи энтропии с энергией. Планк пришел к формуле Вина и ошибочно заявил, что пределы справедливости ее совпадают с пределами справедливости второго начала термодинамики.

Когда вскоре опыт показал непригодность формулы Вина, Планк исправил свое утверждение: формула не вытекала из второго начала, а только удовлетворяла ему. В исправленном виде она оказалась в наилучшем возможном согласии с опытом. Чтобы обосновать ее теоретически, потребовалось воспользоваться методом Больцмана.

Введя в теорию кванты и определив их конечную величину, Планк оставался на почве классической электродинамики и сводил их появление к своеобразному закону излучения света атомными осцилляторами.

В 1905 г. появилась заметка Эренфеста, показавшего, что кванты — это новая гипотеза, а не вывод из классической теории. В том же году Эйнштейн опубликовал новую теорию оптических явлений, в которой сама лучистая энергия строилась из квантов — фотонов. Физические явления фотоэффекта, люминесценции, закон Стокса были настолько наглядны, что они убедили многих физиков и меня в том числе. Я попытался построить теорию лучистой энергии по аналогии с кинетической теорией газов. Сами собою вытекали закон Больцмана и закон смещения Вина, но для вывода формулы Планка пришлось допустить возможность любого числа квантов в той же ячейке. По совету Рентгена, я отправился в Химзее, близ Мюнхена, к Планку узнать его мнение о теории фотонов.

Планк отнесся к ней отрицательно. Помимо явных отличий фотонов от молекул газа (несохранение числа фотонов) и необходимости актов поглощения и испускания для достижения равновесия, он особенно подчеркивал желательность остаться в рамках теории Максвелла. «Она так много дала физике и, наверное, еще немало полезного даст в будущем, надо поэтому быть ей благодарным и без крайней необходимости не отступать от нее. Раньше, чем рассматривать другую точку зрения, следует убедиться, что положение старой — безвыходно. Лучше бы Вы придумали, как понять факты, приведенные Эйнштейном, в рамках классической теории». Планк все еще надеялся, что это возможно! На вопрос, согласится ли он как редактор *Annalen der Physik* \* поместить мою статью, он ответил, что не будет возражать против ее напечатания, но предпочтет, чтобы это сделал второй

\* *Annalen der Physik*.

редактор, Вип, а лично он будет сожалеть, что опубликован еще шаг в сторону от Максвелла.

Это было в 1910 г. С тех пор Планк под влиянием фактов уступал постепенно свои позиции, но все же решительного шага в направлении квантовой теории не осмелился сделать.

Планк предпочитал факты, не затрагивающие строения лучистой энергии. В беседах со мною он не касался опытов по квантовому строению света, но с интересом относился, например, к работам по электрическим и механическим свойствам кристаллов. Каждый раз, когда я бывал у него для совместного обсуждения этих фактов, приглашался также Грюнейзен.

На семинаре в Берлинском университете Планк редко принимал участие в дискуссиях и ограничивался вопросами, в отличие от его ученика Лауэ и Эйнштейна.

Вспоминая свои посещения Планка в Грюневальде — предместье Берлина, не могу забыть его музыки. Он был блестящим пианистом, глубоким знатоком классической музыки. Не все помнят, что Планк изучал вопрос о темперированной нормальной гамме, что он читал в Берлинском университете лекции по теории музыки. Как отличался Бах в классическом исполнении Планка от легкого человеческого Баха у Эренфеста! Как различны были размеренный поток звуков у Планка и задумчивая скрипка Эйнштейна! Все они любили музыку и охотно играли, каждым я восхищался, но совсем по-разному. Мне пришлось слышать и Гейзенберга, рояль которого наполнял комнату океаном звуков.

Жизнь Макса Планка, о которой он рассказал на банкете и которую описал в автобиографии, несложна: приват-доцент в Мюнхене, профессор в Киле, профессор теоретической физики Берлинского университета и член Берлинской Академии наук, ее непреходящий секретарь в последующие годы. В этой должности он получил мое последнее письмо с отказом быть членом Берлинской Академии наук в период человеконенавистнического режима Гитлера.

Вспоминая научные работы Планка, мы видим развитие понятия энтропии и термодинамики сложных систем и растворов, борьбу за правильное понимание второго начала термодинамики, а потом последовательную интерпретацию третьего начала. В центре стоит термодинамика лучистой энергии, приведшая его к статистической физике и к кванту действия; стремление сочетать кванты с электродинамикой, как ее дальнейшее развитие в микромире; серия статей по релятивистской термодинамике; борьба с формалистической школой Маха и Оствальда, не поднявшаяся, однако, до последовательного диалектического материализма; защита культуры и ученых от гитлеровского расизма, не доведенная до активной борьбы или до отказа от ответственных должностей.

В связи с 200-летним юбилеем Академии наук СССР Планк выступал в Ленинграде и Москве и дал высокую оценку совет-

ской науки. Симпатии к Советскому Союзу не помешали ему, однако, присоединиться однажды к враждебному выступлению немецких ученых.

Таков, по моим представлениям, был Планк, создавший новую физику, доживший до ее расцвета, до ее победы, переживший крушение династии Гогенцоллернов и гибель гитлеровского нацизма. Планк видел рост социализма, расцвет его культуры и умел это ценить.

Но своим воспитанием и симпатиями он был связан с классической эпохой термодинамики и электродинамики, с немецким патриотизмом XIX в. и с религией.

Искренний и честный сын своего времени и своего народа, он был неустанным талантливым тружеником, открывшим благодаря глубокому анализу неожиданную сторону в явлениях природы.

Моральный и научный авторитет Планка был непререкаем для физиков во всем мире.

В ряду научных событий, определивших научную революцию XX в., решающим были кванты Планка, вышедшие из расчета спектрального распределения излучения абсолютно черного тела.

В истории науки кванты действия произвели такой же переворот, как и великие открытия Галилея и Ньютона.

Статья опубликована в кн.: Макс Планк. 1858—1958. Сборник к 100-летию со дня рождения. М., 1958.

Она представляет собой обработанную стенограмму выступления на объединенном заседании Отделений физико-математических и химических наук совместно с Институтом истории естествознания и техники, состоявшемся 17 апреля 1958 г. в Москве и посвященном 100-летию со дня рождения М. Планка.

## АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

Альберта Эйнштейна я впервые увидел в Берлине. Первые же его работы 1905 г. — броуновское молекулярное движение, фотонный механизм действия света и теория относительности — оказали решающее влияние на дальнейшее развитие физики и на идеи физиков, в том числе и мои.

Для меня лично теория относительности и фотоны придали реальное содержание возникшему у меня еще в средней школе недоверию к световому эфиру и в то же время вскрыли новую сторону взаимодействия света с веществом.

Экспериментальная работа Эриха Ладенбурга (брата Рудольфа Ладенбурга, работавшего у Рентгена) по внешнему фотоэффекту, хотя и приводила, по мнению автора, к выводам в пользу резонансной теории Ленарда, при ближайшем анализе подтверждала эйнштейновы фотоны. Вскоре (в начале 1907 г.) я опубликовал заметку, в которой показал, что измеренная Ладенбургом энергия фотоэлектронов на самом деле связана с частотой света линейно,



а не квадратично, как утверждал автор, что было в полном соответствии с теорией Эйнштейна. Кроме того, я указал путь окончательного решения вопроса о фотонах — изучение фотоэффекта щелочных металлов: натрия, калия и их сплава. Около четырех лет я посвятил этой работе, но не опубликовал ее в физических журналах, так как появилась статья Милликена, в которой задача была решена с большей точностью, чем удалось сделать мне.

Я очень хотел поговорить о всех этих вопросах с Эйнштейном и вместе со своим приятелем Вагнером поехал к нему в Цюрих. Однако дома мы его не застали, и поговорить нам не удалось. Жена его сообщила (с его слов), что он только чиновник патентного ведомства и о науке думать серьезно не может, а тем более об экспериментах.

Возможно, что работа Эйнштейна в патентном ведомстве не была столь бессмысленной. Когда в 20-х годах я узнал его ближе, оказалось, что в нем сильны тенденции изобретательства. Вместе с художником Орликом и зубным врачом Гринбергом Эйнштейн разрабатывал новый тип полиграфической машины для художественной графики. За ним уже числились различные технические изобретения, и он никогда не прекращал попыток в этом направлении.

В своих статьях Эйнштейн часто характеризовал свои идеи как эвристические точки зрения. Поэтому свое посещение мы мотивировали желанием выяснить, существует ли Эйнштейн как реальное физическое явление или лишь как некоторая эвристическая точка зрения. Он позже ответил, что как физик, действительно, не существовал.

В Цюрихе, и особенно, когда Эйнштейн занял кафедру физики в Пражском университете, его творческая работа развернулась широко. Затем он перешел на специально для него созданную и хорошо оплачиваемую должность академика при Прусской Академии наук в Берлине. Такую же должность ранее предлагали Рентгену. Здесь Эйнштейн читал лекции и активно участвовал в работе коллоквиума в университете. Однако, как он мне однажды сказал, берлинская обстановка его не удовлетворяла. Люди, с которыми ему приходилось обсуждать вопросы физики, не жили наукой, она была лишь побочной деталью их существования.

А чем была научная мысль для Эйнштейна, показывает случай, о котором хочется вспомнить и рассказать во всех деталях.

Во время одного из моих приездов в Берлин Эйнштейн заинтересовался моими исследованиями механических и электрических свойств кристаллов; он просил меня рассказать о них подробнее. Помню, в 3 часа дня я пришел к нему и вскоре приступил к изложению своих опытов. Примерно через час зашла его жена и просила Эйнштейна в 5 час. принять какого-то человека, приехавшего из Гамбурга познакомиться со знаменитым ученым. Эйнштейн избегал таких встреч и всего, что могло иметь характер рекламы или подчеркивало его знаменитость. Видимо, в своей

семье он не находил поддержки. Поэтому он увел меня в соседний парк, чтобы беспрепятственно продолжать беседу. Только когда опасность встречи миновала, мы вернулись в его кабинет.

Часа за два я рассказал все существенное, и тогда начался исключительный по глубине и настойчивости процесс освоения нового для Эйнштейна материала. Процесс этот можно охарактеризовать как органическое введение новых фактов в сложившуюся ранее единую картину природы.

Наступило 8 час. вечера, нас позвали к ужину; но и здесь работа мысли и обсуждение темы не прекращались, продолжала усваиваться духовная пища, а усвоение материальной пищи происходило по указаниям жены — что взять на вилку и когда направить ее в рот. Внимание Эйнштейна было далеко от макарон, которыми нас угощали. По окончании ужина работа мысли продолжалась; все с новых и новых сторон обсуждались факты и их толкование. Приближалась полночь, уходил последний поезд в Вердер, где я жил, под Берлином. Я предложил продолжить беседу завтра или в любой другой день, но увидел, что смысл моих слов не доходил до Эйнштейна, и не стал настаивать. Наконец, в 2 часа ночи процесс закончился — все стало на свои места, сомнения выяснены; прибавился еще один участок в лишенной внутренних противоречий картине окружающего мира, которую создал себе Эйнштейн.

Ни мне, ни, вероятно, большинству ученых не приходилось наблюдать такое длительное и систематическое напряжение мысли. Но для Эйнштейна это было, видимо, привычным делом. Так вскрывались нерешенные проблемы, так они разрешались или возбуждали новые идеи.

Для многих научная деятельность сводилась к изучению и разрешению тех задач или тех их сторон, которые удастся разрешить. Наряду с этим остаются невыясненными, быть может, еще более фундаментальные проблемы, но ими займутся другие. Для Эйнштейна не было частных решений. Проблема одна, а разные ее стороны — только пути к проникновению в то, что происходит в природе.

В этом заключалась громадная сила Эйнштейна, его гениальность. Но это сделалось и трагедией его жизни. Теория относительности, развившаяся в теорию тяготения, оставляла в стороне электромагнитное поле. Между тем Эйнштейн был убежден, что существует единое поле, различными проявлениями которого являются тяготение и электромагнетизм. Он настойчиво стремился к единой теории поля, но не мог ее создать. Оставить же нерешенной глубокую проблему, с которой столкнулся, Эйнштейн по своему научному складу не мог. Свыше тридцати лет своей жизни, до самой смерти, он затратил на поставленную перед собой цель и 30 лет не мог заняться никакой другой задачей. Так почти бесплодно протекали эти годы, хотя они были богаты яркими переживаниями для Эйнштейна. Новые гипотезы, их анализ, выявле-

ние их неубедительности и все новые и новые попытки — это наполняло научную жизнь, но не приносило ожидаемых плодов.

Во время наших прогулок, особенно почных, вопрос о единой теории поля, как о маниакальном увлечении, из которого не было выхода, часто подымался самим Эйнштейном, но разговор всегда сводился к изложению последней из его гипотез, от которой он ждал удачи, после чего мог бы вернуться в сферу физики. Гипотеза проваливалась, а через год-два появлялась новая.

Я видел гибельность такого положения вещей для самого Эйнштейна, но, конечно, ничем не мог ему помочь в деле разработки единой теории поля. Однажды — это было в 1926 г. — я попытался сбить его с безвыходного пути. Мы вместе направлялись в Брюссель на заседание комитета Сольвея. С 11 час. утра до 10 час. вечера мы провели в одном купе поезда, направлявшегося из Берлина в Амстердам. Это было еще до окончательного оформления квантовой теории.

Я построил свое наступление следующим образом. Обрисовав глубокие противоречия, вызванные обнаружением квантовых явлений в микромире, и разброд мыслей физиков, я высказал убеждение, что Эйнштейн со своей исключительно физической интуицией скорее, чем кто-нибудь другой, может найти выход. В интересах науки от имени физиков я потребовал, чтобы Эйнштейн нашел выход. Как бы его ни отвлекали проблемы единого поля, он обязан выполнить свой моральный долг и сосредоточить свою мысль на проблеме теории квантов.

Чтобы обосновать свое требование, я предложил ему прослушать мой рассказ о том, кто такой Эйнштейн, что это не только и не столько создатель теории относительности, которая принесла ему славу. Не менее важно его влияние на все физическое мирозерцание.

Я напомнил броуновское движение, оценку размеров молекул исходя из вязкости раствора, квантовую теорию теплоемкости твердых тел, вырождение газов, теорию лучистой энергии, статистику испускания и поглощения лучистой энергии, фотоны и правило Стокса, новую статистику и даже данное им объяснение обрывистости высоких правых берегов рек. Я показал, как эти открытия вошли в историю физики и повели ее к новым достижениям. И в то же время Эйнштейн устраняется от самой трудной задачи, ставшей перед физикой. Нельзя не видеть тумана мистики, который обволакивает четкие контуры физики; в науку вливается неверие в свои силы, отказ от реальности самой природы. Выход один — Эйнштейн обязан выполнить свой долг и не имеет права скрываться в пучинах единого поля. У ученого не одни преимущества, но и обязанности перед историей.

Времени у нас было много. Эйнштейн объяснял, как легко, в сущности, приходили его новые мысли — почти как неизбежный вывод — и как мало убедителен поэтому был их успех. Я пытался показать, какие глубины в явлениях природы вскрывали эври-

стические точки зрения и конкретные идеи Эйнштейна и насколько его интуиция, разъяснившая уже столько запутанных положений науки, необходима именно на данном этапе. Он обещал приложить все свои силы, чтобы перестроиться, но сомневался, что это ему удастся.

Эйнштейн был Нобелевским лауреатом, но представление его к премии со стороны немецких физиков происходило не без противодействия со стороны, конечно, антисемитов, а также некоторых ученых-консерваторов, не способных простить ему перелома в науке. Отношение к Эйнштейну в Германии было как бы пробным камнем политических настроений. Рентген рассказал мне об этом и о своем решении всемерно поддержать кандидатуру Эйнштейна, что он и сделал.

Политические взгляды Эйнштейна определялись ненавистью к прусской военщине и милитаризму, к полицейским методам подавления свободы. Он стоял всегда на стороне демократии и социального прогресса. Однако мысли его были далеки от политических проблем, и поэтому многие его выступления в этой области следует признать непродуманными.

Приведу следующий факт. Однажды в конце 20-х годов группа германских ученых, воспользовавшись одной из судебных ошибок, составила антисоветское воззвание, под которым и обнаружил подпись Эйнштейна. Когда я рассказал ему, что случай, о котором шла речь, только повод для выступления против Советского Союза, он ответил, что не подумал об этом, но подписал по телефонному звонку Планка. Я спросил, считает ли он правильным, что в разгар борьбы нового социального строя с предрассудками старого Эйнштейн оказывается по ту сторону баррикады, в лагере прусского капитализма. Он ответил: «Конечно нет, я бы не подписал, если бы подумал о последствиях. В будущем не буду участвовать в политических действиях, не посоветовавшись с Вами».

Столь же непродуманным является, на мой взгляд, его поддержка сионистского движения. Жена убедила его даже выступить на концерте, который был организован сионистами в синагоге.

Еще одним примером может служить его увлечение американской идеей «единого государства», которая, по существу, была предназначена для того, чтобы, дискредитировав естественное стремление каждого народа к самостоятельности, облегчить большим и богатым странам захват и эксплуатацию малых. А Эйнштейн сначала принимал внешний фасад за существо дела. По этому вопросу состоялась опубликованная в нашей печати переписка между Эйнштейном, с одной стороны, и академиком Вавиловым и мною, с другой.

Что касается философских взглядов Эйнштейна, то, насколько я могу судить, они были столь же непоследовательными, как и его политическая позиция. Несомненно, что, воспитанный в эпоху Маха, он признавал его концепцию физики, но, с другой стороны, столь же несомненно, что идея экономии мышления как оправда-

ния теоретической физики, была далека от него. Реальность внешнего мира и его познаваемость были для Эйнштейна непререкаемой истиной, из которой вытекало его требование единой картины внешнего мира. Мне казалось, когда мы затрагивали такие вопросы, а это было редко и без интереса с его стороны, что в Эйнштейне сочетается материалист с почитателем Маха, система которого казалась ему стройно построенной.

Эйнштейн еще на ранней стадии развития ядерной физики понял заключающуюся в ней опасность. Он предвидел возможность того, что атомная бомба может попасть в руки Гитлера, а тогда гибель грозит всему, что ему было дорого, что он ценил в мире. Возглавив группу физиков, он поставил этот вопрос перед президентом США Франклином Рузвельтом. Это привело к организации работ по созданию атомной бомбы силами англо-американских физиков. Поэтому инициатором создания ядерной бомбы многие в США считают Эйнштейна. Однако, когда уже после фактического решения исхода войны встал вопрос о Хиросиме и Нагасаки и, особенно, когда бомба из защитницы цивилизации стала ее прямой противоположностью, Эйнштейн и в еще большей степени Джемс Франк восстали против ее применения.

Заканчивая свои воспоминания об Эйнштейне, я не могу не сказать о нем, как о прекрасном скрипаче. Аккомпаниатора в его семье не было, и однажды мы отправились к знакомым. Он взял с них слово, что никого посторонних не будет, но они воспользовались посещением Эйнштейна, чтобы продемонстрировать его. Увидев, что за открытой дверью собралось несколько человек, Эйнштейн пришел в страшное негодование и приступил к игре только тогда, когда двери были плотно прикрыты и никого, кроме нас и аккомпаниатора, не было видно.

Когда Эйнштейн решил переехать в США и принял предложение Принстонского института высших исследований, к его приезду была организована торжественная встреча. Но Эйнштейну удалось ускользнуть от своих почитателей, и другим путем, в одиночку, он приехал в Принстон и позавтракал в первом попавшемся ларьке.

Эйнштейн был дважды женат. Первой его женой, еще когда он жил в Швейцарии, стала югославская студентка-математичка. С детьми он обращался довольно сурово, и они принесли ему мало радости. Позже, когда я бывал у него в Берлине, его женой стала его кузина. Однако она не сделалась его близким другом и всячески противодействовала его стремлению держаться вдалеке от всяких чествований и демонстраций его мировой славы. Я решаюсь сказать об этом потому, что об этом в самой резкой форме говорил мне Эйнштейн.

Берлинский магистрат принял постановление о передаче Эйнштейну участка земли на берегу озера вблизи Берлина, где он мог бы спокойно отдыхать. Такая перспектива радовала Эйнштейна, но тут начались недоразумения: оказалось, что магистрат

подарил участок, принадлежащий другому лицу. Стали подыскивать другой участок. Немало препятствий пришлось преодолеть Эйнштейну, пока он смог построить свою дачу, но и ту скоро отняли, когда к власти пришел Гитлер.

Своей жизнью в Принстоне он был доволен — здесь он спокойно жил и работал и сделался для местных ребятшек курьезным старичком с взлохмаченной головой, которого все любили.

До последних дней своей жизни он не переставал работать над единой теорией поля. Он не страшился смерти. Больше всего его огорчала мысль, что он уйдет из жизни, не доведя до конца своей теории.

Статья опубликована в журнале «Успехи физических наук», 71, 3—7, 1960 к 5-летию со дня смерти А. Эйнштейна.

Упомянутые в статье работы А. Ф. Иоффе по правильному (в пользу фотонной теории Эйнштейна) толкованию опытов Ладенбурга опубликованы в 1907 г. в ЖРФХО и воспроизведены во втором томе его Избранных трудов (с. 9). Первая личная встреча Иоффе с Эйнштейном состоялась в Берлине 19 мая 1922 г. Упомянутое письмо «О некоторых заблуждениях проф. Альберта Эйнштейна», подписанное А. Ф. Иоффе, С. И. Вавиловым, Н. Н. Семеновым и А. Н. Фрумкинским, опубликовано в журнале «Новое время», № 48, с. 14, 1947.

## МОЯ ЖИЗНЬ И РАБОТА

### РЕАЛЬНОЕ УЧИЛИЩЕ

В среднюю школу, реальное училище в г. Ромнах, Полтавской губернии, я попал очень рано. Мне не было еще 8 лет, когда в 1888 г. открылся подготовительный класс. За компанию со старшими я отправился на страшный тогда конкурсный экзамен и без труда был принят. С этого началась систематическая учеба. До тех пор мною руководил только интерес к новым фактам, в таком изобилии рассеянным по книжкам, и к приемам счета, ловко придуманным правилам, заменяющим трудную задачу расчета в уме. Я не знал, что эти правила — арифметика; мне они казались каким-то не очень честным способом, с помощью которого можно, не думая, давать правильный ответ. Помню, меня очень удивляло, что школа именно этим механическим правилам сложения, умножения и деления придавала главное значение. Потом, когда мне удавалось разобраться «по существу» в заковыристой задаче, казалось обидным узнать от учителя, что для каждого рода таких задач, с бассейнами, с едущими навстречу путешественниками, с делением наследства, существуют готовые механические шаблоны, дающие правильный ответ без размышлений.

Все преподавание в наше время было формальным: нужно было знать, а не понимать. И все же того вреда, которого можно было ждать, школа не принесла, — ей не удавалось отучить учеников думать. Спасала нас вражда к преподавателям. Учителя — это чиновники, начальство, связанное с полицией. Против них —

товарищеская организация учеников. Мы старались разыскивать, читать и обсуждать именно те книги и вопросы, которые преподаватели считали преступными. Паряду со скучными обязательными учебниками мы добывали нелегальные книжки, слушали рассказы высланных студентов. Вот пример наших отношений к преподавателям. Когда мы сдали последний выпускной экзамен, нас собрал классный наставник, преподаватель математики, и обратился к нам с паутуственной речью: «Я знаю, что вы хотите меня убить, так знайте, что со мною всегда ходит Гордей (училищный шпик), и вы попадете на каторгу». Не всех мы ненавидели, иных жалели (если их преследовал директор, например за пьянство), но никого не любили. Учителя в целом были враждебным лагерем. Среди учеников были их сторонники — вылощенные мальчишки, пижопы, как мы их называли; они оставались вне товарищеской среды. Впрочем, отчетливого, сознательного раслоения в школе не было.

Большое влияние на всю мою научную деятельность оказали две идеи, возникшие еще в школьные годы. Одна из них относилась к так называемому мировому, или световому, эфиру. На уроке физики учитель рассказал, что распространение света можно объяснить колебаниями частиц светового эфира, быстро передающимися от частицы к частице и достигающими нашего глаза, вызывая ощущение света. Эти колебания меня очень заинтересовали, и, придя домой, я пытался наглядно представить себе свет лампы и поведение эфира в комнате. Но вдруг мне пришло в голову: как же доходит до нас свет Солнца и отдаленных звезд? Ведь нельзя же себе представить, что в безграничных пространствах вселенной, где ничего нет, все же остается эфир для передачи нам световых колебаний. А за пределами вселенной, куда не проникает ни один световой луч? Что же — и там есть эфир, который миллиарды лет ни чем себя не проявляет, но все же существует на случай, если туда попадет свет, так как иначе нам этого света не объяснить.

Мысль, что все мировое пространство заполнено веществом, единственное назначение которого облегчить нам понимание распространения света, если он там пройдет, мне показалась абсурдной. Когда я, вопреки обыкновению не говорил учителям о том, что нас интересует, поставил этот вопрос, то узнал, что этот абсурд есть убеждение физиков. Да, эфир имеется везде, но колебания его возникают лишь там, где есть свет. Можно ли еще по какому-нибудь признаку, кроме света, узнать, что между звездами есть эфир? Нет! Этого достаточно. Меня этот ответ мало удовлетворил. Мне казалось, что в природе свет распространяется на самом деле не через эфир. Нужно придумать какое-то другое объяснение, и я решил это объяснение искать — задание для высшей школы, которую я представлял себе как место научной работы,

Года через два у меня возникла другая идея — о природе запаха. Колебания светового эфира различной частоты создают

различные цветовые ощущения в глазу. Колебания различной частоты струн, натянутых в улитке внутреннего уха, дают ощущение различных звуков. Но ведь разнообразие запахов не меньше, чем разнообразие цветов и звуков. А между тем обоняние объясняют химическим воздействием пахучих газов на нервные окончания в слизистой оболочке носа. Ведь нет же особых нервов для каждого из многочисленных запахов. Нет ли сходства и в механизме запаха и света? Не является ли запах колебательным движением, которое, приводя в колебание (в различной степени) три основных обонятельных нерва, создает ощущение самых разнообразных запахов? Какие это колебания? Лучи света, даже попадая во внутреннюю полость носа, не пахнут. С другой стороны, я прочел в книжке Тиндаля о теплоте, что ничтожнейшая примесь пахучих веществ к воздуху в десятки и сотни раз увеличивает поглощение инфракрасных волн — колебаний более медленных, чем видимый свет. А поглощается газом лишь то, что он сам испускает.

Вот откуда я заключил, что механизм, который создает ощущение запаха, — это инфракрасные колебания, такие же, как световые, но меньшей частоты. Колебания чего? Здесь я снова наталкивался на эфир, в существование которого я не верил. Мне казалось, что, разобравшись в колебаниях запаха, я пойму и колебания света, узнаю, как можно обойтись без мирового эфира.

#### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Из реального училища путь был только в техническую высшую школу. Я выбрал Санкт-Петербургский технологический институт, так как думал, что там легче, чем в горном или путейском можно заниматься физикой и разобраться в природе запаха. Мне не было 17 лет, но этого не заметили, и я был принят. Через несколько месяцев начались студенческие волнения, забастовки. Профессора оказались такими же врагами, какими были учителя в реальном училище. Теперь я знаю, что некоторые были серьезными учеными, но тогда мне не приходило в голову искать у них совета и помощи в разрешении интересовавшего меня вопроса о запахе. Запах — граница между биологией и физикой. Я читал книги по физике, главным образом курс О. Д. Хвольсона, книги по физиологии органов чувств и пытался работать по биологии. В Технологическом институте читался курс микробиологии (это, кажется, относилось к производству пива), и в лаборатории можно было работать, так как других охотников не было. С большим увлечением я приступил к двум научным работам, развел сотни склянок с культурами бактерий. Но тут начались очередные демонстрации и забастовка, и я был исключен из института. К маю исключенные снова были приняты, но культуры покрылись плесенью и высохли. Работа погибла.

В институте мы занимались только в чертежных — чертили и проектировали. Лекций никто не слушал. Других занятий почти



не было. Только весной, к началу экзаменов, мы узнали, какие предметы читаются на курсе. Экзамен сдавали по определенной программе и о технических предметах снова забывали до следующей весны. Иногда только, когда период исключения затягивался с января—февраля (когда начинались волнения) до осени, приходилось заниматься в сентябре.

Летом — обязательная практика. В 18 лет я в первый раз должен был участвовать в сборке железнодорожного моста на линии Полтава—Ростов. Но инженер, который должен был возглавить строительство, так и не приехал, и мне сразу пришлось вести все работы совершенно самостоятельно. А вопросы были ответственные. Вместо того, чтобы строить на сваях деревянные подмостья, на которых полагалось по проекту собирать мост, я решил использовать ближайшую насыпь и оттуда перекатить готовый мост весом в 200 т по рельсам на свои устои. Малейший просчет, и мост свалился бы в реку. Затем оказалось, что инженер, строивший устои и быки, не знал точных размеров железного моста, и последний не вошел в подготовленные устои; пришлось отрубить часть железных консолей. Все разрешилось благополучно. Немало ночей просидел я над техническими справочниками, чтобы не паделать ошибок. Постройка моста закончилась для меня большим разочарованием. На среднем быке опоры обоих пролетов пришлось поставить так близко друг к другу и так близко к краю подферменного камня, что возникла опасность: опора могла сорвать кромку камня. У меня это было предусмотрено: между опорами я хотел поместить соответствующую чугунную болванку. Но тут запротестовал главный инженер. Несмотря на все мои настояния, так и не положили прокладки.

Еще хуже окончилась практика следующего года — постройка новых мастерских на Ижорском заводе. Это был казенный завод Морского ведомства, где эксплуатация рабочих и производ достигали совершенно невероятных размеров. О действительных интересах производства никто не думал. Железные изделия обходились в два раза дороже, чем на частных заводах и частном рынке, но заработная плата была ниже, чем где-либо. Годами существовала дикая система: очень высокие расценки сдельной работы при очень низкой зарплате. Сколько бы ни выполнить, оплачивалось не больше 20% сверх зарплаты. Поэтому не было смысла работать больше трех дней в неделю — остальное время уходило на ремонт машин и починку зубчатых колес. Каждый приезд начальства сопровождался ухудшением условий труда.

Сборка мастерских, изготовленных Путиловским заводом, продвигалась быстро, значительно опережая установленные сроки, при меньшем, чем предполагалось, числе рабочих. Поэтому завод не вмешивался во внутренние отношения и организацию работы и даже терпел более высокие ставки рабочим. Но однажды мы столкнулись на «принципиальном» вопросе рабочей политики. Из-за праздников работы были приостановлены на неделю, во-

преки моему протесту. Я потребовал, чтобы рабочим на это время были выданы хотя бы авансы, так как знал, что многим без этого не прожить. Несмотря на то что я это поставил условием продолжения работ, администрация не могла отойти от своих «принципов». Пришлось оставить работу. Когда на следующий год мне было предложено взять на себя сборку и установку всех железных мостов на Сибирской ж. д., я поставил условием, чтобы администрация не вмешивалась в организацию работы; на это завод пошел.

Столкновение с «принципами» рабочей политики русских заводов и явная безнадежность преодолеть их, оставаясь на службе заводским инженером, окончательно определили мое решение отказаться от инженерной деятельности. Заниматься наукой в высшей школе было невозможно. Попытки произвести исследование природы запаха в домашней обстановке при помощи коробки от какао, каменной соли и сургуча показали, что в этой обстановке убедительных результатов получить нельзя и что ставить опыт — это особое искусство. Единственное, что оставалось — учиться эксперименту и именно в той области, где он стоит выше всего, — в физике. Но заниматься научной работой в России тех лет, как показал опыт с заплесневевшими бактериями, было безнадежно. По отзывам петербургских физиков, лучшим физиком-экспериментатором был Рентген, профессор Мюнхенского университета. К нему я и поехал. У меня хватило средств на полгода скромной жизни.

### МЮНХЕНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В Мюнхен я приехал перед самыми рождественскими каникулами. На другое же утро я отправился в университет разыскивать Рентгена и внезапно столкнулся с ним. Прежде всего я ощутил, что школьных знаний немецкого языка, на которые я рассчитывал, совершенно недостаточно. Больше того, я даже не мог объяснить, чего я хочу. 10-дневные каникулы были посвящены изучению немецкого языка. С утра до ночи я переводил немецкий учебник физики. Итак, первое препятствие было устранено. Мне было разрешено одному работать в лаборатории. За месяц я проделал полный цикл (60) работ по физике и затем провел исследование с электрическими волнами. Один случай сыграл здесь некоторую роль. Работая по спектральному анализу, я получил одно значение, явно не укладывавшееся в общую закономерность. Рентген это сразу заметил и хотел показать, как следует произвести это измерение с наибольшей точностью. Но его результат и по величине и по точности совпал с моим. Оказалось, что в русском издании таблиц, которым я пользовался, была ошибка. Рентген отметил мое уважение к опытному факту и точности измерения — наиболее ценные с его точки зрения качества будущего физика.

Весной 1903 г. П. Кюри опубликовал измерения, показывающие, что лучи радия выделяют значительную энергию. Рентген

предложил мне проверить этот результат. Мне удалось показать, что тот конец запаянной стеклянной трубки, куда пересыпаются находящиеся в трубке крупинки препарата радия, нагревается. Затем я уже сам предложил и провел метод точного количественного учета этого тепла и придумал целую серию возможных объяснений источника энергии радия. Одно из этих объяснений особенно заинтересовало Рентгена, и он предложил вместе с ним произвести соответствующее исследование. Магнитные свойства радия не были известны. Среди громадного многообразия веществ есть три элемента, в миллионы раз более магнитных, чем все остальные. Могло бы оказаться, что неисследованный радий еще во много раз более магнитен и нагревается оттого, что находится в непостоянном земном магнитном поле. Это предположение не оправдалось, но исследование выявило другие интересные факты и затянулось на долгий срок. Отъезд пришлось отложить. Поскольку средства мои иссякли, то университет оказал мне некоторую денежную поддержку.

Вопрос о запахе был мною опять отложен, так как Рентген предложил мне изучить причины электризации кристаллов кварца при сжатии и растяжении. Для этого он хотел воспользоваться так называемым упругим последствием. Явление это заключается в том, что тело, растягиваемое или изгибаемое какой-нибудь нагрузкой, не сразу принимает свой окончательный вид, а лишь постепенно, с течением времени. После разгрузки оно так же медленно принимает свою прежнюю форму. Разобравшись в этом вопросе, я, однако, пришел к убеждению, что последствие может существовать лишь в беспорядочно построенных телах, а в кристалле кварца его быть не должно. Те явления, которые наблюдаются в кварце, — это не последствие; они вызваны побочными причинами, которые можно устранить. Это утверждение я действительно доказал на опыте. Главной причиной, вызывавшей замедление и запаздывание, были электрические заряды, скопляющиеся внутри кварца при его изгибе. Мне удалось значительно ускорить отвод этих зарядов из кварца, подвергая его действию лучей радия, рентгеновых лучей и ультрафиолетового света.

Отсюда я пришел к изучению влияния всех этих лучей на прохождение электрического тока через разные кристаллы. С большим увлечением я сообщил о своих новых по тому времени результатах Рентгену, находившемуся в Италии. В ответ я получил очень сухую открытку с предложением бросить сенсационные открытия и заняться солидной работой по упругому последствию.

Для личности Рентгена очень характерно, что, как только открытые им лучи привлекли широкое внимание, как только о них стали писать не только в серьезных научных журналах, но и в газетных статьях, он перестал ими заниматься и хотел заставить меня прекратить изучение нового явления, потому что оно связано с его лучами и радием. Кстати, все мои исследования над энергией, выделяемой радием, не были напечатаны.

Я предложил Рентгену отказаться от публикации этих опытов, но не изучать их я не мог. Больше двух недель он со мною не разговаривал, а я в это время, изучая каменную соль, совершенно запутался. Электрическая проводимость после освещения рентгеновыми лучами делалась то во много раз больше, то меньше без всяких видимых оснований. Мне приходило в голову, что причиной этого здесь может оказаться дневной свет, но выяснилось, что соль при освещении не меняет своих свойств. И вот однажды, изучая образец, освещенный рентгеновыми лучами, я заметил, что уменьшение тока всегда связано с прохождением облака; яркий солнечный свет снова увеличивал ток. Оказалось, что свет сам по себе не действует на соль, но после действия рентгеновых лучей соль становится чрезвычайно светочувствительной: ток при освещении может увеличиваться в миллион раз по сравнению с током в неосвещенном образце. Когда Рентген увидел, что обычный свет, даже свет спички, резко меняет электрические свойства соли, он настолько этим заинтересовался, что предложил присоединиться к работе.

С тех пор, с 1904 г., и до самой смерти Рентгена (1923 г.) продолжалась наша совместная работа над электрическими свойствами кристаллов. До 1906 г. мы работали вместе в Мюнхене, затем до самого начала войны я каждое лето проводил в его лаборатории. Два раза, в 1908 и 1911 гг., мы приступали к написанию статьи для печати. Но я излагал результаты на фоне тех представлений, которые у меня выработались в ходе работы. Рентген же хотел объективного изложения, которое бы чисто формально описывало все полученные результаты, не высказывая никаких гипотез об их причинах и не пытаясь их объяснить. Чтобы убедить его в ошибочности его метода, я изложил весь огромный материал в семи главах и приложил к ним семь разгадок, занимавших не более полустраницы каждая, сразу освещающих смысл бесчисленного нагромождения фактов данной главы. Три дня Рентген вместе со мной проверял, действительно ли все факты каждой главы объясняются разгадкой. Казалось, он убедился и согласился, чтобы я написал статью по-своему. Но потом он решил сам написать ту же работу привычным ему методом. Описание небольшой части опытов с каменной солью, подготовленное им, появилось в 1921 г. в объеме 200 страниц.

Весь громадный опытный материал — 16 тетрадей наблюдений и свыше 300 страниц примечаний — хранился во время войны у него. Шовинизм, так пышно расцветший во время империалистической войны, не позволил и думать о публикации нашей совместной работы. На случай своей смерти до окончания войны он распорядился сжечь все материалы по этой работе. В тот же конверт с надписью о сожжении в случае смерти Рентген вложил материалы более поздних исследований (1921—1922 гг.), когда мы вместе просматривали материалы.

В 1923 г. Рентген неожиданно умер, и все эти материалы были сожжены. К счастью, основные извлечения наших работ незадолго до этого были мною уже посланы в печать, и Рентген читал корректуру. Благодаря расхождению в методах изложения, моих и Рентгена, работа, написанная в 1908 г., появилась в печати (в извлечениях) через 15 лет — в 1923 г. Все остальные материалы погибли, но о них не стоит писать.

Мне, однако, хотелось бы упомянуть о нескольких фактах, освещающих личность Рентгена — человека замкнутого, необычайно строгого и к другим и к себе. Это был блестящий экспериментатор. Три коротенькие статьи, вышедшие в течение года, в которых он изложил свойства открытых им лучей, дали исчерпывающее их описание. Многие сотни работ, посвященных рентгеновым лучам на протяжении 15 лет, ничего к ним не прибавили.

Когда Вильгельм II при осмотре Германского музея естествознания и техники в качестве специалиста стал объяснять Рентгену отдел артиллерии, Рентген прервал его, сказав, что в его объяснениях нет ничего, кроме общих мест, всем известных. Вильгельм был оскорблен до глубины души.

Рентген был богат. Одна Нобелевская премия, которую он получил первым, дала ему 200 000 крон. Все его деньги были в голландских бумагах. Когда в начале войны германское правительство обратилось с предложением передать государству валюту, Рентген отдал все без изъятия. В 1921 г., когда я его видел, он не мог чаще раза в неделю покупать мясо. В год острого недостатка продовольствия, и особенно жиров, его друзья из Голландии присылали ему большие количества масла. Он все отдавал в общий фонд и дошел до такого истощения, что врачам пришлось перевести его на больничный паек, чтобы спасти от голодной смерти.

Весь пропитанный чувством долга, но стоящий в стороне от жизни, сторонящийся повизны с ее незаконченными очертаниями, Рентген был одним из последних представителей ученых-одиночек, десятилетиями вынашивающих и отделяющих свои труды. Это была крупная личность, но ей не было места в современности. Кратковременная Советская власть в Баварии гарантировала ему полную безопасность и уважение, но нельзя было бы надеяться привлечь его на свою сторону.

## ПЕТЕРБУРГ

Теперь город с таким названием имеется лишь во Флориде в США, а раньше так назывался Ленинград. В 1906 г., в разгар столыпинской контрреволюции, я возвратился в этот город. Нелегальные массовки, революционные ячейки в войсках, студенческие забастовки — такова была атмосфера, в которую я попал по возвращении. Отказавшись от профессуры в Мюнхене, я был за-

числен лаборантом по физике в Политехнический институт в Соновке. Это был единственный живой центр научно-технической мысли. Виктор Львович Кирпичев объединял науку с техникой, понимаемой в широком плане. Тимошенко, Митквич, Рерих, Бахметьев удачно осуществляли это объединение. Серьезная научная работа велась по химии (школа Курнакова, Кистяковского), по геологии (Левинсон-Лессинг). С другой стороны, технические науки сочетались с экономическими и историческими (научная школа статистики А. А. Чупрова, экономическая география Дена). В институте искали новых педагогических методов, велась практическая проработка теории; ставились специальные научные работы студентов. На фоне застоявшихся в традиционных формах других технических школ и русских университетов здесь, в Политехническом институте, чувствовались зачатки нового, развернувшегося полностью только при Советской власти.

С 1906 г. и до настоящего времени я связан с Политехническим институтом. Войдя в организовавшуюся уже группу физиков, я встретил со стороны заведующего кафедрой физики проф. В. В. Скобельцына и со стороны всего состава самую определенную поддержку всех моих научных начинаний. Вскоре почти все присоединились к разрешению поставленных мною задач. Потом удалось привлечь и студентов. Большую роль сыграл приезд в С.-Петербург Эренфеста — теперь голландского профессора и большого друга Советского Союза. Вместе с ним мы начали борьбу с застоявшимися нравами Петербургского университета, за тесную чиновниками Министерства просвещения московскую группу П. Н. Лебедева. Главной ареной этой борьбы было Физическое общество, фактическое руководство которым вскоре перешло к нам. Во время войны удалось удержать физику от повиннистического угара, охватившего университет. Кстати, профессором университета я не был избран как пропешший немецкую школу и сторонник германской науки. Большую борьбу пришлось вести с допотопной системой магистерских экзаменов, которые практически почти на два десятилетия лишили всех способных физиков возможности заниматься наукой. Я уже сдавал экзамены по новым правилам, не требующим хождения на дом к каждому из многочисленных экзаменаторов и сдачи целого десятка отдельных экзаменов.

Защитив, как полагалось, две диссертации, я в дополнение к иностранному званию доктора философии, получил здесь звание доктора физики, а с ним и профессию в Политехническом институте. Преподавание физики в большинстве высших школ начиналось с изучения в течение полугода измерительных приборов — нониуса, делительного круга и т. д. Этого достаточно, чтобы навсегда отбить всякий интерес к физике. Я же попытался рассказать студентам сразу то, чем действительно живет современная физика, начав с общих представлений о строении атома, о молекулярных силах, о кристаллических решетках, и оказалось, что

эта живая наглядная физика воспринимается несколько не труднее, чем формальные законы и правила измерений. В Горном институте я читал термодинамику. В университете читал курс чистой энергии. Одно время читал на курсах Лесгафта, где оставался некоторое время и после смерти основателя этих курсов.

Из 10—12 учеников, работавших как в университете, так и в Политехническом институте был в 1916 г. образован семинар, который впоследствии и составил ядро Физико-технического института. В нем участвовали Н. Н. Семенов, Я. И. Френкель, П. Л. Капица, П. И. Лукирский, Н. И. Добронравов, Я. Г. Дорфман — теперь крупнейшие физики с мировыми именами. Остальные, если и не достигли по разным причинам такой научной высоты, то все же оставили заметный след в науке. Семинар был первым опытом коллективной проработки одной большой темы. Этот опыт мы положили в основу работы Физико-технического института.

Научная работа за это время шла по двум направлениям. С одной стороны, мы продолжали и развивали работы по прохождению электрического тока через кристаллы, начатые в Мюнхене. Все материалы по этим работам пересылались Рептгену и были сожжены после его смерти. Другой ряд работ исходил из возникшего еще в средней школе недоверия к механическому эфиру. В конце 1905 г. появилась статья Эйнштейна, в которой он приводил целый ряд фактов, показывающих, что свет распространяется в виде отдельных световых квантов через пустое пространство. Этот взгляд, так согласующийся с моими представлениями, заставил меня подумать об его экспериментальной проверке. В 1907 г. Ладенбург опубликовал работы по измерению фотоэффекта, которые я как раз собирался произвести. Автор пришел к совершенно иным результатам, но, проанализировав его данные, я убедился, что они гораздо лучше согласуются с теорией Эйнштейна, чем с теорией автора. Для проверки теории световых квант требовалась иная постановка опыта, к которой я и приступил. Опыты оказались весьма трудными и заняли четыре года упорного труда. За это время я опубликовал свою теорию световых квант; такие же точно опыты были одновременно проведены и опубликованы в Америке Милликемом. Главное мое внимание было направлено на прочное установление атомного строения электричества и света, на разъяснение всех накопившихся в литературе противоречий. Позднее я еще раз вернулся к вопросу о свете.

## РЕВОЛЮЦИЯ

Значение Октябрьской революции я не сразу понял. Взятие власти большевиками я сначала рассматривал как один из эпизодов революции, определяемый стремлением кончить войну, и думал, что решающая роль будет принадлежать крестьянству,

спавженному оружием в результате демобилизации. Однако моя поездка летом в Крым, где под покровительством германской оккупационной армии держалась буржуазная власть и где я наблюдал звериную ненависть крымских либералов к пролетариату, покушение на Ленина в Москве окончательно определили мою позицию. Для меня уже не было сомнений — у пролетариата светлое будущее, у буржуазии жалкое догнивающее прошлое.

Возвратившись в сентябре 1918 г. в Петроград, я твердо решил навсегда связать свою судьбу со страной Советов и внести свою долю в будущее строительство. Уже через несколько дней я принял предложение организовать вместе с М. И. Неменовым институт. В научном отношении нас объединяла общая тема — рентгеновы лучи, тогда самое мощное орудие новой физики и новый метод в медицине; политически — мы оба твердо стояли на платформе Советской власти. 24 сентября был утвержден персональный состав нового института — сначала физико-технического отдела Государственного рентгенологического и радиологического института, который затем при разделении получил название Физико-технического рентгеновского института.

Основной установкой нового института была такая организация физического исследования, которая могла бы сделать физику научной базой будущей социалистической техники. Хотя в это время внимание было устремлено на фронты, но все же Советская власть всемерно содействовала организации науки. Представители Наркомпроса — т. Гринберг, а потом Кристи — сыграли здесь большую положительную роль. К указанной основной цели мы пошли следующими путями. Сначала надо было расширить научную базу. К группе моих учеников присоединились другие физики Петрограда и Москвы и ряд ученых-техников. С самого начала к работе был привлечен А. А. Чернышев, к которому вскоре перешло руководство технической частью института. С тех пор наша совместная работа не прекращалась. Затем после организации института в Петроград возвратились Френкель и Семенов. Последний со своей организаторской способностью и энергией помог развернуть институт до его нынешних размеров. Новую установку — физику как основа будущей техники — я постарался обеспечить не только в Петрограде. После небольшой конференции в Москве в декабре 1918 г., в январе 1919 г. в Петрограде собрался довольно многочисленный съезд физиков (свыше 100 человек со всей страны), который принял нашу установку и учредил ассоциацию, собравшую с тех пор уже семь съездов. На последнем съезде в Одессе было уже свыше 1000 членов. Основная линия на тесную связь физики с техникой с тех пор не менялась.

Другой задачей было обеспечение института и советской физики кадрами. С этой целью осенью 1919 г. при Политехническом институте был организован физико-механический факультет, в котором физика сочеталась с основами техники. Почва для



такого факультета была подготовлена Политехническим институтом. Очень рано, иногда уже со 2-го курса, студентов привлекали к научной работе, и ко времени окончания втуза почти все имели один или несколько печатных трудов. Физико-механический факультет в насмешку называли детским домом, но опыт себя оправдал. Для научной работы отбирали только самых способных студентов, которым удавалось вести исследования, не удлинняя срока своего пребывания во втузе.

Первые годы при каждом сокращении штатов факультет пытались закрыть, мотивируя это тем, что раньше обходились без него, значит, и теперь в нем нет большой нужды. Требовалось вмешательство центральной власти, чтобы сохранить факультет. Почти десять лет я был деканом факультета, но по мере развертывания масштабов научной работы все больше отходил от оперативного руководства. Меня заменяли М. В. Кирпичев и Н. Н. Семенов. Последний положил начало значительному количественному росту преподавательского состава и студентов. Сейчас благодаря энергии М. С. Лазуркина факультет стал самостоятельным втузом с 1000 студентами. Связь с исследовательским институтом и теперь осталась столь же тесной. Это — основная база кадров не только нашего института, но и весьма многих отраслевых институтов промышленности и заводских лабораторий.

В 1921—1922 гг. я впервые после войны поехал за границу для закупки оборудования. Пришлось также восстанавливать порванные войной связи с германскими учеными и ликвидировать научную изоляцию Советской России. Курьезно, что первый германский физик Ленард, институт которого я хотел осмотреть (это был совершенно новый радиологический институт в Гейдельберге), оказался отъявленным шовинистом и не принял меня, поручив передать, что не желает разговаривать с врагами своего отечества. Оказалось, что во время войны он ездил по стране, призывал к уничтожению не только России, но и русского народа.

Оказанный мне «прием» сделался широко известен. Многие американские ученые, приезжая в Германию, нарочно являлись к Ленарду, чтобы получить ту же отповедь. Впрочем, случай этот вовсе не был типичным; даже фашистски настроенные ученые, а их немало, поддерживают научную связь с советскими учеными. Германские научные журналы самым гостеприимным образом представили свои страницы работам наших ученых, несмотря на то что последние годы мы заполняли больше четверти всего их объема (только с 1932 г. мы приступили к изданию собственного журнала на иностранном языке). Путем взаимного обмена лекциями и докладами, участия в съездах и конференциях мы теперь установили прочную связь с наукой передовых капиталистических стран, и советская физика стоит с ними на одном уровне.

Начиная с 1921 г. я почти ежегодно бывал за границей с целью знакомства с заграничным опытом, выяснения важнейших научных вопросов, проведения дискуссий, консультаций и т. д. В крупнейших европейских университетах: в Париже, Берлине, Геттингене, Лейдене, Кембридже, в 15 американских университетах и во всех крупных заводских лабораториях я читал доклады и лекции. В Калифорнийском университете и Бостонском технологическом институте я читал систематические курсы. Благодаря этому я мог на деле познакомиться с организацией научной работы и преподавания в университетах и промышленных предприятиях Запада и Америки. В крупнейших электротехнических заводских лабораториях Германии и Америки я руководил техническими исследованиями и давал консультации. Часть институтского оборудования и около 20 заграничных командировок сотрудников института были оплачены за этот счет. Много раз я принимал участие в международных конгрессах по физике, энергетике и истории науки как член советской делегации.

С другой стороны, советские физические съезды устраивались с участием крупнейших иностранных ученых. Мы обеспечивали возможность советским физикам полнее использовать присутствие иностранцев. Одновременно знакомили иностранцев с размахом нашей научной работы и нашего строительства. VI съезд проходил на особом пароходе, идущем от Нижнего Новгорода до Сталинграда, VII съезд — от Одессы до Батума и обратно. Систематическое посещение наших институтов иностранными учеными и работа в них также вошли в норму.

В 1923 г. была наконец закончена постройка нового здания института; до тех пор мы ютились в физической лаборатории Политехнического института. К этому времени мы уже считали выполненной первую стадию своего развития — создание достаточно мощного ядра физиков — и перешли к разворачиванию применений физики в промышленности, присоединив к институту Наркомпроса лабораторию ВСНХ.

Вскоре мы убедились, что для тесной связи науки с производством не хватало важного звена — заводской лаборатории. В 1925 г. было проведено обследование ленинградских заводов и составлен план оборудования их 113 лабораториями. Не без трудностей этот план в основном был проведен в жизнь, а за ним последовало проведение такой же работы по всему Союзу.

С укреплением научного коллектива в Ленинграде стал на очередь вопрос о кадрах других промышленных центров страны. Насколько вначале необходима была концентрация всех сил в одном центре, настолько же вредным было бы дальнейшее продолжение такой политики. В отдельных республиках и областях должны быть созданы самостоятельные центры научной работы, связанные с задачами местной промышленности. Нужен не один центральный институт и его местные отделы, а система инсти-

тутов, специализированных в определенном направлении, и в этом направлении основных для Союза. Мы и приступили к развертыванию такой сети, организовав физико-технические институты в Харькове и Томске. В ближайшее время предстоит организовать такие институты в Свердловске, Ташкенте, Ростове. Съезды физиков также служили этой цели. VI съезд 1928 г. собрался в Москве; затем участники его посетили Нижний Новгород, Казань, Саратов, Тифлис. К сожалению, необходимость создания по всей стране центров научно-технической работы не была подкреплена соответствующим финансированием этих центров, и решения съездов не были проведены в жизнь. Еще хуже обстоит дело с Москвой, которая и до настоящего времени не имеет достойного ее физического института.

Первые же годы пятилетки показали, что, несмотря на быстрый количественный и качественный рост физических исследований и на ясную установку связи физики с техникой, советская физика стала отставать от предъявляемых ей запросов. Явно необходимы были более действенные новые пути. Я вижу их в объединении всей советской физики в единый организм с общим рабочим планом, составляющим часть всего народнохозяйственного плана. Плановость в науке, как и плановость в хозяйстве, — путь к социализму. Далее, я считаю, что темы для своих изысканий наша наука должна черпать не только из заграничной литературы, но и из изучения производственных процессов, которые должны обогатить физику новым содержанием. Наконец, нужно вовлечь в общий план научной работы широко развернутое рабочее изобретательство, а рабочий-изобретатель должен стать основным ядром научных кадров. Знания должны приобретаться параллельно с разработкой изобретений, с исследовательской работой. Самое ценное в научном работнике — это его способность к научному творчеству и твердая воля к преодолению всех встречающихся препятствий. Наибольшее число таких нужных для науки и социально ценных работников могут выделить рабочие-изобретатели.

## НАУЧНАЯ РАБОТА

Переходя к описанию моей научной работы, я прежде всего должен указать, что ее никак нельзя рассматривать как чисто личное занятие. Как содержание ее, так и методы работы определялись историческими условиями и социальными заданиями эпохи строительства социализма, который все мы имеем счастье строить. Если вместо школы в несколько учеников я создал большой исследовательский институт, если я ставил и разрешал вопросы серьезного теоретического и практического значения, то это, конечно, не моя личная заслуга. Подготовленный до некоторой степени условиями, которые я пытался изложить вначале, я попал в русло революции, и потом уж только активное участие

в величайшей в истории человечества задаче построения социализма сделало меня сознательным ее работником. Чем бы я занимался и как работал бы в иных исторических условиях, вряд ли стоит гадать. Во всяком случае, не тем и не так, как сейчас. Я хочу сказать этим, что одни биографические сведения дореволюционной эпохи никак не могут объяснить всей моей научной работы.

Я должен заранее указать и еще на одно обстоятельство, о котором я уже говорил. Я не только вел свою индивидуальную работу, но и руководил научной работой быстро растущего института. Первые 7—8 лет я фактически участвовал в постановке и разработке почти всех работ института, и только постепенно начали выделяться в пределах института группы, самостоятельно идущие вперед, вплоть до образования самостоятельных институтов (химико-физический, электрофизический, Украинский, Томский, Уральский). С другой стороны, и мою научную работу я проводил не один, а вместе с коллективом в 10—15 человек. Поэтому, если бы я даже захотел со всей добросовестностью выделить долю моего личного участия в научной работе, это было бы неосуществимо и бессмысленно. Выделенная из общей коллективной работы и оторванная от своих социальных корней живая работа превратилась бы в бессодержательный перечень, вроде загадки, где по первому или последнему слогу каждой строки надо угадать стихотворение. Такой задачи я себе и не ставлю. Я хочу изложить содержание и развитие четырех основных проблем, разрешению которых была посвящена главная часть моей научной деятельности; при этом я не выделяю своей личной доли в этой работе.

#### МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ (ПРОБЛЕМА ПЕРВАЯ)

Первым фактом, с которым я столкнулся в этой области, было явление упругого последействия. Оно заключается в том, что результат воздействия данной силы на тело сказывается не весь сразу. Изгиб, кручение, растяжение продолжают, постепенно ослабевая, еще долгое время под действием постоянной силы. Точные приборы могут отметить медленный ход даже через несколько месяцев. Когда сила перестает действовать, тело не сразу принимает прежний вид. От каждого воздействия остается, таким образом, след, который можно заметить долгое время спустя после исчезновения вызвавшей его причины. Имеет место нечто вроде памяти в теле о том, что оно испытало в прошлом. Рентген предложил мне воспользоваться этим явлением, чтобы при помощи него выяснить, что именно вызывает электризацию кварца при сжатии: самая ли сила, на него действующая, или вызванное этой силой сжатие кристалла.

Если положить на кварцевый кристалл груз, то сила с течением времени не будет меняться, пока на кристалле лежит тот же неизменный груз, а сжатие благодаря упругому последствию может продолжаться еще долгое время. Если и электризация при этом будет усиливаться, значит, она зависит от сжатия; если же она останется неизменной, значит, она определяется не сжатием, а самой силой давления груза.

Взявшись за эту задачу, я из средства сделал цель исследования. Меня заинтересовала природа упругого последствия. Постепенное изменение размера тела было бы понятно в том случае, если бы в нем (теле) происходили какие-нибудь сложные процессы. Но какие процессы могут происходить при сжатии кристалла? По тем представлениям, которые мы себе составили о кристаллах, при сжатии происходит только сближение частиц, которое должно бы закончиться очень быстро, в ничтожные доли секунды (со скоростью распространения звука в кварце). Одно из двух: либо наше представление о кристалле неверно, либо в нем не должно быть последствия. Действительно, последствие всегда наблюдали на телах, состоящих из массы мелких кристаллов, или на неупорядоченных смесях, где сжатие производит сложные перегруппировки. Никто не изучал кристаллов под этим углом зрения; а это необходимо было сделать, чтобы проверить правильность моего заключения. Вот почему я и взялся за изучение упругого последствия кристаллического кварца.

Я уже упоминал, что последствие, которое я сначала наблюдал при изгибе кварцевых пластинок, не было истинным последствием, а результатом тех электрических зарядов, которые образовывались внутри пластинки при изгибе. Избавившись от зарядов, я избавился и от всякого измеримого упругого последствия.

Эта работа привела меня к изучению электрических свойств кристаллов, но далеко не все было ясно и в области механических свойств. Если первое противоречие разъяснилось и упругое последствие можно было считать результатом несовершенств в строении большинства реальных твердых материалов нашей техники, то оставался ряд других непонятных свойств — прежде всего длительная пластическая деформация, которая в той или иной степени наблюдается почти во всех телах, и в частности в кристаллах. Мне кажется характерным для тогдашнего мюнхенского периода моей работы, что, выяснив мучившее меня логическое противоречие, я удовлетворялся фактом, что в совершенных кристаллах упругого последствия нет, и не интересовался тем, как оно протекает в обычных материалах, которыми пользуется вся современная техника. Точно так же не я, а другие физики применили это свойство кристаллического кварца к практическим задачам (пружины Бриллюэна для точных измерений, стабилизация и стандартизация радиоволн пьезокварцем, ультракороткие звуковые генераторы Ланжевена).

И никто до сих пор еще не разобрался в упругом последодействии технических материалов и его влиянии на перераспределение напряжений в сооружениях.

Только в 1918 г. я вернулся к вопросу о механических свойствах кристаллов. К этому времени теория Борна дала уже конкретную картину тех сил, которые связывают частицы кристалла в одну цельную, правильно построенную решетку, а открытие Лауэ дало новый путь к изучению этих решеток. Суть этого открытия заключается в том, что благодаря правильному расположению атомов в решетке имеется целый ряд плоскостей, представляющих собою как бы сетку из атомов. Каждый такой усеянный атомами слой, подобно зеркалу, отражает пучок рентгеновых лучей, отбрасывая их на светящийся под их воздействием экран или на фотографическую пластинку. Такой отраженный зайчик позволяет установить сетку атомов, от которой он отброшен. По длине волны отраженных рентгеновых лучей можно, далее, судить о расстояниях между отдельными параллельными атомными слоями и, таким образом, составить себе полную картину распределения атомов в кристалле.

Это открытие Лауэ как нельзя более пригодно для выяснения того, что на самом деле происходит в теле при любых воздействиях на него. С другой стороны, реальная возможность для использования этого открытия — рентгенова установка. Моя работа с рентгеновыми лучами, совместно с группой сотрудников, была налажена с организацией физико-технического отдела Рентгеновского института. Это и была первая моя работа в новом институте.

Однако прежде чем изложить саму работу, мне хотелось бы на примере открытия Лауэ, протекавшего почти на моих глазах, отметить типичные черты научных открытий и роль того автора, с именем которого открытие остается связанным в учебниках истории как проявление его личности.

На теоретическом семинаре проф. Зоммерфельда в Мюнхене докладывалась работа Эвальда об оптических свойствах правильно расположенной решетки из электронов. В лаборатории Рентгена в это же время производились опыты и вычисления для определения длины волны рентгеновых лучей, показавшие, что эта длина порядка миллиардных долей сантиметра. И та и другая работа обсуждалась на еженедельных беседах за чашкой кофе — традиция, которую мы установили еще за несколько лет до этого. И вот один из участников этих бесед — Лауэ — высказал мысль, что если длина волны рентгеновых лучей только немногим менее, чем расстояния между атомами в кристаллической решетке, то кристалл должен представлять для рентгеновых лучей то же самое, чем для обычного света является так называемая дифракционная решетка (пластинка с густо, на одинаковых расстояниях нанесенными штрихами или царапинами, служащая для спектрального разложения света).

Другой участник беседы (покойный Эрнст Вагнер), наоборот, считал это утверждение фантастическим, так как в кристалле ряды атомов расположены хотя и на равных расстояниях, но не в одном направлении, параллельно друг другу, как в оптической решетке, а по всем направлениям, взаимно перекрещиваясь. Лауэ все же утверждал, что какая-то правильность должна сказаться. Для решения этого спора решено было привлечь работавшего у Рентгена с рентгеновыми лучами Фридриха. Он должен был поставить на пути рентгеновых лучей кристалл и посмотреть, не отразят ли его атомные слои лучей на помещенную над кристаллом фотографическую пластинку.

Несколько дней непрерывного действия рентгеновых лучей не дали никакого результата, пока работавший в той же комнате Книппинг не решил поставить фотографическую пластинку на пути лучей, прошедших сквозь кристалл, вместо того, чтобы помещать ее сверху. По-видимому, он стремился привести опыт к скорейшему окончанию, так как на пластинке должен был появиться во всяком случае след от рентгеновых лучей. Оказалось, однако, что вокруг этого следа от лучей, прошедших сквозь кристалл, появились еще правильно расположенные пятна-зайчики, отраженные от определенных атомных слоев внутри кристалла. Впрочем, толкование Лауэ было сложнее. Такой простой смысл ему придали английский физик Брэгг и русский кристаллограф Ю. Вульф — энергичный работник нашего института.

Мне кажется, на этом примере хорошо видно, как подготавливается научное открытие, какую роль играет способность синтезировать разнородные факты, связь между теорией и опытом и, наконец, какова роль случайной удачи в ускорении результата. Работа была опубликована тремя авторами — Лауэ, Фридрихом и Книппингом. Все элементы открытия имелись уже налицо. Нельзя сомневаться, что открытие Лауэ было бы сделано им и без Фридриха и Книппинга, если не в 1912, то уж во всяком случае в 1913 г.

Теперь я возвращаюсь к своему применению метода Лауэ для изучения механизма деформации в кристаллах. Вместо фотографической пластинки я воспользовался экраном, светящимся под действием рентгеновых лучей. После 15—20 мин. пребывания в совершенно темной комнате глаз прекрасно различает отдельные светящиеся пятна, получающиеся от отражения атомными слоями внутри кристалла. Если атомы этих слоев переместятся, повернутся, то и пятно сместится. Наблюдая таким путем, что происходит с атомами кристалла, подвергаемого все увеличивающейся нагрузке, мы заметили, что как только нагрузка превзойдет определенный предел, пятна раздваиваются, потом появляются рядом третьи, четвертые, десятые, сотые и т. д.

Это значило, что один кристалл с одинаково расположенными атомными слоями распадается на два, три, сто отдельных кри-

сталликов, несколько повернутых относительно друг друга, но составляющих все же одно прочное целое. Одно из пятен при этом оставалось неизменным. Это показывало, что все перемещения и повороты происходят вдоль определенной плоскости, которая не меняется и которая одинакова во всех кристаллах. Эти наблюдения и это толкование изменений, происходящих в рентгеновой картине, создаваемой кристаллом, были затем подтверждены многими авторами и развились в целую науку, изучающую процессы холодной обработки металлов и металлических кристаллов.

Изучая далее сдвиги отдельных кристалликов, мы обнаружили их необычайную правильность. Под действием данной нагрузки отдельные сдвиги происходят один за другим, через одинаковые промежутки времени, и на совершенно одинаковые перемещения. Если в лаборатории нет шума, можно отчетливо слышать эти сдвиги, подобные тиканию часов. То, что при грубом наблюдении представляется как медленное, непрерывное течение материала, в действительности состоит из большого числа отдельных сдвигов и поворотов внутри отдельных кристаллов, из которых состоит материал. При помощи рентгеновых лучей можно было отчетливо заметить, при какой нагрузке начинается расслоение пятен, т. е. сдвиги и повороты частей кристалла. Оказалось, что эта нагрузка тем меньше, чем выше температура, а при температуре, близкой к плавлению кристалла, уже самые ничтожные силы вызывают сдвиги в кристалле. Можно было утверждать, что в каменной соли, на которой проведены наиболее тщательные опыты, плавление наступает тогда, когда уже всякая, самая ничтожная сила может нарушить правильность кристалла и заставить его течь.

Далее мы обнаружили, что самый процесс сдвигов меняет все свойства кристалла, делает его более жестким, более прочным. По мере нарастания пластической деформации прочность возрастает от нескольких сот граммов на  $1 \text{ мм}^2$  до 5—6 кг.

Казалось, что момент, когда в рентгеновых лучах замечаются повороты в кристалле, соответствует первому признаку изменения кристалла. Однако применение других методов показало, что еще задолго до этих поворотов могут уже начаться сдвиги в кристалле.

При комнатной температуре в каменной соли повороты в рентгеновых лучах замечаются при нагрузке в 920 Г на  $1 \text{ мм}^2$  поперечного сечения кристалла. Но при изгибе в микроскоп можно заметить пластическое смещение уже при нагрузке в 200 Г, а при помощи разработанных нами (И. В. Обреимов, Л. В. Шубников, М. В. Классен) оптических методов в очень хороших кристаллах можно обнаружить первый сдвиг уже при нагрузке в 10 Г. Чем больше произошло сдвигов, тем большие усилия необходимы, чтобы создать новые сдвиги, — кристалл становится жестче, менее пластичным.



Наряду с изучением пластичности мы занимались и изучением прочности на разрыв. Теория кристаллических решеток утверждала, что силы, связывающие атомы кристалла в одно целое, в несколько сот раз больше тех, которые на самом деле уже разрывают кристалл. Это противоречие необходимо было выяснить, чтобы понять механизм разрушения кристаллического тела. Оказалось, что нагрузка, при которой наступает разрыв кристалла, действительно очень мала по сравнению с вычислениями теории (400 Г вместо 20 кГ на  $1 \text{ мм}^2$ ) и что она почти совсем не меняется ни при нагревании до  $600^\circ$ , ни при охлаждении до  $-180^\circ$ . При высоких температурах течение начинается раньше, чем наступает разрыв, и поэтому каменная соль является пластичной как воск. При низких температурах кристалл разрывается раньше, чем он может начать течь, и соль кажется хрупкой. Нет хрупких и мягких материалов; все зависит от соотношения при данных температурах между пределом текучести и пределом прочности.

Одно из возможных объяснений того, что реальная прочность на разрыв так мала по сравнению с теоретической, — это предположение, что разрыв никогда не происходит сразу по всему сечению, а начинается с маленькой трещины, которая, углубляясь, все далее разделяет кристалл на две части. В каждый момент вся нагрузка действует только на маленький участок около края трещины, а для этого маленького участка нагрузка достаточно велика, чтобы углубить трещину. Понятно, что нужно гораздо большее усилие, чтобы разделить сразу по всей ширине полоску бумаги, чем, надорвав край, постепенно ее разорвать. Если это объяснение правильно, то нужно было ожидать, что от свойств поверхности, от существования или легкого образования на ней трещин будет зависеть прочность всего кристалла.

С целью по возможности устранить существующие на поверхности трещины и предотвратить их образование мы погрузили кристалл каменной соли в горячую воду, которая быстро растворяла и постоянно обновляла его поверхность. Действительно, прочность при этом повысилась во много десятков раз. Правда, здесь мы имеем дело уже не с первоначальным отдельным кристаллом, а с целой системой сдвинутых и повернутых относительно друг друга кристалликов, так как под водой пластическая деформация идет чрезвычайно быстро и упрочняет кристалл. Но важно, что самые силы сцепления действительно гораздо больше, чем при разрыве одиночного сухого кристалла; легко происходят только сдвиги, а не отрыв частей кристалла. Даже в том случае, когда находящаяся в воде часть кристалла во много раз тоньше, кристалл никогда не рвется в воде, а всегда в сухой части. Этот очень наглядный опыт теперь обычно показывают на лекциях по физике. Так как под водой прочность соли во много раз выше, чем предел ее текучести, то под водой соль уже

не хрупка, а, наоборот, чрезвычайно, пластична. Это тоже весьма легко воспроизводимый опыт.

Другой опыт, который показывает, что дело здесь не в изменении свойств соли, омываемой водой, а в поверхности кристалла, был нами произведен позже. Из каменной соли вытачивался шарик, который предварительно охлаждался в жидком воздухе; затем он внезапно переносился в расплавленное олово или свинец. Здесь внешние слои шарика быстро нагревались, тогда как его центральная часть оставалась еще совсем холодной. Внешние слои поэтому расширялись и растягивали по всем направлениям внутреннюю часть шарика. Напряжения в центре достигали десятков килограммов на квадратный миллиметр, и тем не менее шарик не разламывался. Все дело здесь в том, что напряжения, растягивающие кристалл, существуют только внутри и достигают больших значений в самой центральной части, тогда как поверхность шарика свободна и никаких растяжений не испытывает. Поэтому поверхностные трещинки дальше не распространяются.

Как в случае с кристаллом, погруженным в воду, так и в опыте с шариком мы убедились, что в кристалле, обычно разрушаемом напряжениями в 0,5 кГ, можно создавать напряжения в 20 раз большие, не разрушая его, если только позаботиться о том, чтобы на поверхности не создавалось трещины, способной своим ростом разорвать кристалл. Каково бы ни было толкование этих фактов, они показывают, что силы, связывающие твердое тело, в десятки раз больше тех, которые его обычно уже разрушают.

Раньше, чем эти данные были опубликованы, они каким-то образом сделались известными за границей и вызвали там целый поток газетных статей о том, как увеличение прочности материалов повлияет на технику. Писали о мостах из проволок, пароходах, в несколько дней достигающих Австралии, новых перспективах для транспорта, в особенности воздушного, легких машинах и т. д. Печатались интервью с крупнейшими учеными без того, чтобы кто-нибудь знал точно, в чем дело. Однако между наблюдением исключительной прочности кристалла каменной соли и получением такой же прочности технических материалов — громадный путь; да и успех весьма сомнителен. В технических материалах масса мелких кристалликов, у каждого своя поверхность, масса неоднородностей, отсутствующих в отдельном кристалле. Трудно определить, как здесь использовать опыт каменной соли. И действительно, в этом направлении ничего еще не сделано. Значение этих опытов пока заключается в том, что они подтвердили правильность наших представлений о строении кристаллов и дали более прочное основание для использования этих представлений.

Опыты с прочностью соли в воде во всяком случае указывают на большую роль поверхности. Обычно ее не замечают, потому

что внутренние части образца влияют еще больше, чем поверхность. Но чем тоньше образец, тем меньшая часть вещества внутри, и тем большее значение получают поверхностные слои атомов. Можно было ожидать, что в мелко раздробленном виде, в тонких листах, в очень тонких нитях механические свойства будут совсем иными, чем в больших кусках. Действительно, давно известно, что очень тонкие металлические, стеклянные и кварцевые нити обладают особенно большой прочностью. Однако часто возражали, что это происходит не от «тонины» нити, а оттого, что поверхность ее подверглась совсем иной обработке, чем внутренность. Так, например, для получения тонких металлических нитей их волочат, протягивают много раз через все более узкие отверстия, вследствие чего они становятся тверже и прочнее. В стеклянных нитях, быстро застывающих, остаются натяжения, и свойства стекла иные.

Чтобы выяснить роль этих обстоятельств, мы припились за изучение тонко паццеленной слюды, о которой уже никак нельзя было думать, что поверхностный слой как-то изменен обработкой. Результат был тот же: чем тоньше листок слюды, тем больше его прочность, так же как в тонких стеклянных и кварцевых нитях.

Роль поверхности сказывается и в других отношениях. Стоит покрыть поверхность тончайшим слоем какого-нибудь вещества (масла, спирта, воды), как прочность нитей резко меняется: для воды — в 5 раз, спирта — в 4 раза и масла — в 2 раза по сравнению с совершенно сухой нитью.

Эти факты приводят к новому представлению о механической прочности, о механизме разрыва. Мне представляется, что разрыв начинается с течения материала в разных местах внутри разрываемого образца. Напряжение материала здесь ослабевает, зато на краях такой области сосредоточиваются перенапряжения, которые в свою очередь заставляют течь все большие и большие области внутри образца. Достигая поверхности, такое расслабление может привести к образованию трещины или к росту уже существующей трещины. Если эти представления правильны, то они действительно открывают путь к повышению прочности, если и не в десятки и сотни раз, то все же настолько, чтобы получить резкий технический эффект.

#### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ИЗОЛЯТОРОВ (ПРОБЛЕМА ВТОРАЯ)

В то время, когда я приступал в Мюнхене к изучению изоляторов, представления об их электрических свойствах были крайне запутаны. Сами свойства назывались либо электрическим последствием, либо электрическими аномалиями (неправильностями). Что же являлось правильным, нормальным, было неясно. Мне прежде всего удалось показать, что и в изоляторах мы имеем

дело с таким же электрическим током, переносящим электрические заряды, как и в проводниках, но только зарядов этих меньше, и поэтому ток слабее.

Эта естественная мысль отвергалась потому, что ток обычно быстро ослабевал; по выключении внешнего источника появлялся обратный ток, — ток не подчинялся тем законам, которые были установлены для проводников. Непосредственными опытами мне удалось показать, что все эти осложнения происходят оттого, что внутри изолятора при прохождении тока накапливаются электрические заряды, в свою очередь влияющие на силу тока. Учитывая их, мы получаем такие же точные законы тока, как и в проводниках. На основе обширного материала была создана общая теория тока в изоляторе и электрических свойствах твердых тел. И. В. Курчатовым и П. П. Кубеко открыто явление сегнетоэлектричества.

Особый интерес представлял случай, когда заряды скапливались в очень тонком слое вблизи одного из электродов. Концентрация энергии и сила электрического поля в этом слое были так велики, как нигде до тех пор. Французский физик Лапжевен первый обратил внимание на громадные технические возможности, заключающиеся в этом явлении. В течение нескольких лет коллективными усилиями большой группы сотрудников мы пытались разобраться в этом загадочном явлении и использовать его для концентрации электрической энергии. Удалось исследовать распределение зарядов в топчайших слоях изолятора толщиной в тысячную миллиметра и установить законы их накопления, зависимость явления от температуры, тока, свойств кристалла и т. д. В особенности существенную роль играют примеси, находящиеся в изоляторе. Вводя их, можно вызвать скопление зарядов. Очищая изолятор от всяких посторонних примесей и включений, можно совсем освободиться от зарядов. Эта связь позволяет изучить вхождение и распределение различных веществ внутри твердого тела — изолятора. Явление было тщательно изучено, но практическое применение вылилось в совершенно иную форму. Ход исследования показал, что такие исключительные по величине электрические силы потому не разрушают изолятора, что слой, в котором собираются заряды, очень тонок. Любая достаточно тонкая пластинка изолятора обладает такими же свойствами, как и этот тонкий, заряженный слой в кристалле.

Следующей стадией работы было изучение тонких слоев. Для этого оказалось необходимым изучать пленки в тысячные и десятитысячные доли миллиметра толщиной. Опыты привели нас к следующему представлению: когда электрическое напряжение в изоляторе достигает определенных пределов, в нем начинает развиваться электрическая лавина, приводящая к его разрушению или пробое. Заряды, перемещение которых в изоляторе обычно составляет ток, ускоряются здесь настолько, что полу-

чают способность своим ударом выбивать новые заряды. Если бы мы проследили за одним каким-нибудь зарядом на его пути сквозь кристалл, то обнаружили бы, что, постепенно ускоряясь, уже на расстоянии в десятитысячные доли миллиметра он выбивает новый заряд. Эти два заряда, пройдя такой же путь, вырвут еще по одному заряду. При следующем столкновении будет уже четыре заряда, потом 8, 16, 32, 64 и т. д. Легко видеть, что после одного только десятка столкновений один заряд создаст 1000 новых, после двух десятков их появится миллион и т. д. Такое неограниченное нарастание новых зарядов должно привести к пробоям. Как же его избежать? Как ограничиться только немногими столкновениями? А эти-то именно условия мы и имеем в очень тонких слоях; здесь лавина доходит до противоположного края изолятора раньше, чем успеет разрастись и сделаться губельной. Чем раньше будет остановлена лавина, тем лучше; поэтому можно было ожидать, что этот прием будет тем действеннее, чем тоньше слой.

Действительно, первые наши опыты заставили нас думать, что те напряжения, которые совершенно неизбежно пробивают обычные изоляторы, не разрушают его, если тот же изолятор испытывается в виде пленки в тысячную миллиметра толщины. Чем толще была пленка, тем больше в ней накапливалось зарядов и тем сильнее был проходящий через нее ток. Это наблюдение также подтверждало представление о лавине их зарядов.

Такой же прочностью, какой обладает отдельный тонкий слой, должна обладать и комбинация из наложенных друг на друга тонких слоев — тонкослойная изоляция. Для электротехники изоляция со столь высокой прочностью представляла бы громадный интерес. Для технической разработки нового вида изоляции были заключены договоры с крупнейшими американскими и германскими электротехническими фирмами с тем, чтобы на эти работы фирмами были ассигнованы крупные суммы; все результаты должны были быть предоставлены бесплатно нашей промышленности, а изделия, производимые за границей, должны были давать нам определенный валютный доход. Однако цель эта не достигнута, хотя и удавалось получать прочность в 6 млн в на сантиметр вместо 500 000 в, которые раньше определяли прочность изоляции, но в ходе работы применяемые материалы сами по себе были настолько улучшены, что они и без тонкослойности выдерживали до 4—5 млн в. Разница не так велика, чтобы оправдать такой дорогой продукт, как тонкослойная изоляция.

С другой стороны, и представления о причинах пробоя в результате этой работы существенно изменились. Была разработана новая, более точная методика измерений тонких слоев. Произведенное вместе с А. П. Александровым исследование пробоя стекла и некоторых лаков не укладывается в представление о лавине зарядов и не дает увеличения прочности в тонких слоях. Правда,

опыты со слюдой, лаками и разнообразными жидкостями, произведенные в Германии, подтверждают представление о лавине, но есть основание думать, что более подробный их анализ и проверка, которой мы сейчас заняты, и здесь приведут к иным результатам. Для создания новой теории пробоя имеется уже обширный материал, доставленный опытами А. Ф. Вальтера, К. В. Синельникова, А. Хиппеля. Дальнейшая работа в этом направлении (с 1930 г. работа ведется в Ленинграде) покажет, какой прочности удастся реально достигнуть и насколько можно будет удешевить стоимость изоляции.

В ходе работ по тонкослойной изоляции созданы и изучены новые изоляционные материалы (стирол и эфиры целлюлозы), представляющие большие преимущества для нашей электропромышленности. Эти же материалы оказываются чрезвычайно важными и для агрономических целей. Разработаны новые методы защиты от краевого пробоя — главного врага высоких напряжений — и более совершенная методика измерений. Таким образом, эта работа, изменив наши теоретические взгляды, привела и к усовершенствованию техники изоляции.

За последние годы немецким физиком Смекалем было выдвинуто представление, сводящее ток к тем случайным неоднородностям, которые существуют во всяком реальном кристалле. Мне вместе с группой сотрудников пришлось предпринять обширное исследование, чтобы разобраться в этом вопросе. Однако опыты не подтвердили взглядов Смекаля; наоборот, выяснилось с полной очевидностью, что те неоднородности, которые, несомненно, существуют в кристаллах, никакого влияния на его электрические свойства, на его электропроводность не оказывают. В феврале 1930 г. в Берлине состоялась большая дискуссия по этому вопросу, которая не оставила никаких сомнений в неприменимости взглядов Смекаля к теории электропроводности изоляторов.

#### ЭЛЕКТРОНЫ И СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ (ПРОБЛЕМА ТРЕТЬЯ)

В 1910—1911 гг. возникла полемика между американским физиком Миллиkenом и его австрийским коллегой Эренгафтом по вопросу о реальности существования электрона. С другой стороны, я уже упоминал о своем особом интересе к идее распространения света в виде отдельных квантов. На этой почве возник ряд работ, опубликованных лишь частично.

Впервые электроны были получены в сильно разреженных трубках в виде потока, вылетающего из катода (отрицательного полюса) и называемого поэтому катодными лучами. Удалось показать, что они действительно переносят с собою электрический заряд, но одно из свойств, которым должен был бы обладать поток электронов, упорно не подтверждалось. Не удавалось обнаружить магнитное поле, которое должен был бы создать

такой поток вокруг себя. Проапализировав все произведенные опыты, я обнаружил допущенные в них ошибки и, устранив их, мог с достаточной точностью не только установить, но и измерить магнитное действие катодных лучей.

Нужно было, далее, доказать, что эти лучи состоят из отдельных элементарных частиц — электронов. Для этого я воспользовался следующим способом: маленькие заряженные цинковые пылинки вводились между двумя пластинками, из которых нижняя заряжалась электричеством того же знака, как и пылинка; верхняя — противоположным. Можно было подобрать заряд пластин так, чтобы пылинка, отталкиваясь от нижней пластины и притягиваясь к верхней, как раз уравнивала силу тяжести, тянущую ее вниз. Частичка часами висела неподвижно, пока заряд ее не менялся. Если он менялся, то приходилось изменять заряд пластин на вполне определенную величину. Освещая пылинку ультрафиолетовым светом, можно было заставить ее потерять отрицательный заряд.

Изменение заряда никогда не происходило непрерывно. Время от времени с пылинки сразу слетало определенное количество электричества. Многие тысячи таких наблюдений показали, что какова бы ни была частичка по размерам или по составу (например, ртуть вместо цинка), электричество теряется всегда строго одинаковыми порциями, равными заряду электрона. Ни разу не наблюдалась частичка, на которой было бы  $\frac{1}{2}$  электрона или  $1\frac{1}{2}$  электрона. Так как под действием освещения теряется именно электричество, а не атомы вещества, то эти опыты показали, что отрицательное электричество встречается в природе лишь в виде определенного числа целых порций — электронов.

Те же опыты были использованы и для изучения строения того света, который срывает с пылинки электроны. Опыты наши в этом направлении имели следующий вид: алюминиевое острие, находящееся в миниатюрной пустотной трубке, освещалось слабым ультрафиолетовым светом так, чтобы с него время от времени срывались электроны. Эти электроны ускорялись в трубке электрическим полем в 10 000 в и попадали на тонкую алюминиевую фольгу, где создавали световые, или, точнее, рентгеновские кванты. На небольшом расстоянии над фольгой находилась взвешенная пылинка висмута. И вот мы могли наблюдать, как изредка (раз в несколько часов) с пылинки висмута слетал электрон, и тогда он сразу уносил с собою весь тот запас энергии, который другой электрон затратил в алюминиевой фольге при создании кванта света. Таким образом, вся энергия, полученная световым квантом в фольге, целиком передается пылинке, находящейся на расстоянии, которое, хотя и мало, но в тысячу раз больше, чем размер пылинки. Если пылинка получила всю энергию, то тем самым приходится признать, что в других направлениях этот световой квант уже не будет двигаться. Этот

опыт — один из наиболее убедительных фактов, свидетельствующих о квантовой природе света.

Но это только одна сторона его свойств. Одновременно с этим свет является и электромагнитной волной. Синтез этих двух сторон света дан был новой квантовой механикой, которая не только световым волнам приписала свойства движущихся частиц, но и в движущихся частицах обнаружила волновые явления.

Волпы материи и сейчас остаются физически неясными. В результате стремления конкретизировать идею волн материи появился ряд работ по опытному изучению их свойств. Мы пытались выяснить, могут ли эти волны обладать поляризацией, подобно световым и радиоволнам, т. е. обладать разными свойствами в разных направлениях вокруг направления своего распространения. Ответ получился отрицательный. Далее, мы искали резонанс этих волн, их преломление и т. п.

#### ПРОБЛЕМЫ НОВОЙ ТЕХНИКИ (ПРОБЛЕМА ЧЕТВЕРТАЯ)

Осуществление первой пятилетки и подготовка к широкому развертыванию социалистического хозяйства, к генеральному плану электрификации поставили перед советской физикой ответственную задачу — своевременно подготовить научную базу новой техники нашего близкого будущего. Изучая с точки зрения современного знания состояние важнейших областей техники, нельзя не видеть, что в большинстве случаев те возможности, которые заключаются в современной физике, не используются техникой и, более того, физика не развила и не изучила методов, наиболее радикально решающих проблемы энергетики, электрификации, строительства, сельского хозяйства, транспорта.

В течение 1930—1931 гг. я в ряде статей формулировал главные задачи физики в этом направлении. Некоторые из поставленных задач требуют сравнительно небольшого развития и уточнения их физических основ. Главное — это техническая и экономическая разработка каждой отдельной задачи. Только на основе такой разработки можно будет судить о пригодности и значении их для народного хозяйства. К числу этих задач относятся: использование солнечной энергии для опреснения воды, для бытовых нужд, для сушки, выплавки руд и солей, рационализации парников, получения механической энергии и т. д.; применение физики в агрономии: покрытие почвы и растений пленками, лаками и газами с целью усиления прогревания, воздействие физических факторов (токов, лучей, ионов, волн) на почву и растения и т. д.

Новые формы строительства, освещения, вентиляции, отопления, в частности использование для отопительных целей холодильных машин; постройка с минимально возможным протя-



жением внешних стен, с помещениями (нежилыми), лишенными окон как средство к уменьшению расхода топлива; новые источники электрического освещения, дающие больше ультрафиолетового света, особенно источники со светящимся газом; машины, использующие разность температур, существующую на далеком Севере между водой в реках и океане и воздухом.

Среди этих задач некоторые требовали еще самой основной научной проработки. Таков вопрос о непосредственном превращении тепловой энергии в электрическую при помощи термоэлементов. Здесь пришлось поставить задачу изучения природы явления на гораздо более широком круге материалов, чем до сих пор, изучить для этих новых материалов как электрические, так и тепловые их свойства. Был разработан совершенно новый оптический метод измерения теплопроводности материалов, не требующий ни измерений температур, ни затрат тепловой энергии. Широкая техническая задача использования полупроводников привела к необходимости решения глубоких научных вопросов их теории.

Нет основания надеяться, чтобы термоэлементы могли конкурировать с современными тепловыми станциями, но для использования новых источников энергии южного солнца, северного холода они могут оказаться пригодными.

Другая задача — это фотоэлектричество: превращение световой энергии в электрическую. И здесь мы еще далеки от практического решения задачи. Но на пути к ней лежит ряд совершенно достижимых и весьма полезных результатов. Современная электротехника уже начинает пользоваться новыми фотоэлементами, которые одновременно являются и выпрямителями переменного тока. Мы попытались создать теорию этих новых явлений и применить ее к опытному исследованию. И здесь получен ряд весьма интересных новых фактов и выводов.

Если по первым трем проблемам, которыми я и мои товарищи по институту занимались уже 25 лет, имеется ряд определенных результатов, то последние задачи находятся еще в начальной стадии; получены только первые результаты, которые мы надеемся развить в научную базу, подготовляющую будущую технику.

Статья опубликована в виде отдельной брошюры: *Моя жизнь и работа. Автобиографический очерк.* М.—Л., 1933.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редактора . . . . .	Стр. 3
---------------------------------	-----------

### КВАНТЫ, ЯДРА, АТОМЫ, ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Атомы света . . . . .	5
Новые пути научной мысли в области физики . . . . .	16
Непрерывное и атомное строение материи . . . . .	22
Твердое тело как электрическая система . . . . .	29
Развитие атомистических воззрений в XX веке . . . . .	40
Заключительное слово на конференции по физике ядра . . . . .	59

### ПОЛУПРОВОДНИКИ

Полупроводники в современной физике и технике . . . . .	64
Полупроводники в физике и технике . . . . .	74
Полупроводники и их технические применения . . . . .	93
Мечта? Нет — близкая действительность . . . . .	99
Новые пути изучения полупроводников . . . . .	104
Полупроводники и технический прогресс . . . . .	107

### АГРОФИЗИКА

Физика на службе агрономии . . . . .	111
Сельское хозяйство и физика . . . . .	113
Физика и сельское хозяйство . . . . .	116
Советская агрофизика . . . . .	126

### РАЗВИТИЕ СОВЕТСКОЙ ФИЗИКИ

Над чем работают советские физики (совместно с <i>А. К. Вальтером</i> ) . . . . .	132
Советские физики и дореволюционная физика в России . . . . .	157
Инженерно-физический факультет ЛПИ в его прошлом и настоящем . . . . .	173
Большое счастье быть строителем коммунизма! . . . . .	177

### ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Проблема новых источников энергии . . . . .	179
---	-----

МЕМОРИАЛЬНЫЕ И АВТОБИОГРАФИЧЕСКАЯ  
СТАТЬИ

Вильгельм Конрад Рентген . . . . .	188
Мария Склодовская-Кюри . . . . .	196
Супруги Жолио . . . . .	200
А. Н. Крылов в Академии наук . . . . .	203
Яков Ильич Френкель . . . . .	208
Пьер Кюри . . . . .	211
Дополнение к «Воспоминаниям о профессоре П. Эрэн- фесте» Г. Е. Юленбека . . . . .	219
Макс Планк . . . . .	221
Альберт Эйнштейн . . . . .	224
Моя жизнь и работа . . . . .	230

АБРАМ ФЕДОРОВИЧ ИОФФЕ

О ФИЗИКЕ И ФИЗИКАХ

*Утверждено к печати Ордена Ленина  
физико-техническим институтом  
АН СССР им. А. Ф. Иоффе*

Редактор издательства *Т. И. Сушкова*  
Художник *Л. А. Яценко*

Технический редактор *Р. А. Кондратьева*  
Корректоры *Г. Н. Атлас, Р. Г. Гершинская*  
*А. И. Кац и Л. Б. Наместникова*

Сдано в набор 6/XII 1976 г. Подписано к печати  
16/IV 1977 г. Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага № 1.

Печ. л. 16<sup>1/4</sup>+2 вкл. (1/4 печ. л.) =  
= 16<sup>1/2</sup> усл. печ. л. Уч.-изд. л. 18.23.

Изд. № 6415. Тип. зак. 1750. М-17247.

Тираж 31000. Цена 1 р. 58 к.

Ленинградское отделение издательства «Наука»  
199164, Ленинград, В-164, Менделеевская линия,  
д. 1

---

1-я тип. издательства «Наука»  
199034, Ленинград, В-34, 9 линия, д. 12



Академик А. Лавинский



А. Ф. Хоффе.