1947 г. УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК Т. XXXIII, вып. 3

К ТРИДЦАТИЛЕТИЮ СОВЕТСКОЙ ФИЗИКИ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА В СССР ЗА 30 ЛЕТ

Я. И. Френкель

1. ВВЕДЕНИЕ

В прежнее время теоретические проблемы физики как принципиального, так и математического характера, изучались, с одной стороны, физиками, ещё не разделившимися на экспериментаторов и теоретиков, а с другой, — математиками. Умножение этих проблем, усложнение их как в математическом отношении, так и, в особенности, в отношении их комплексности, т. е. связанности с большим числом разнообразных физических явлений, привели, в конце концов, к возникновению особой специальности промежуточного характера по отношению к физике, как экспериментальной науке, и к математике — именно, теоретической физики. Этому способствовало возникновение в первом десятилетии нашего века таких революционных и всеобъемлющих теорий, как электронная теория, теория относительности, теория световых квантов и квантовая теория атомов.

Дальнейшая разработка этих теорий привлекла к себе за границей внимание многих молодых физиков, которые отказались от какой-либо экспериментальной работы и целиком посвятили себя развитию новых теорий и их применению к множеству различных конкретных физических явлений, которые эти теории давали возможность рассматривать в совершенно новом свете.

Представители этой новой специальности не ставят никаких экспериментов и, как правило, не умеют их ставить (являясь в этом отношении объектом добродушного издевательства со стороны экспериментаторов). Их дело заключается в том, чтобы «наводить порядок» в обширном экспериментальном материале, накопленном другими исследователями, находить принципиальные основы физических явлений, вскрывать их внутренний механизм, давать общую математическую формулировку законов, ими управляющих, и путём математического анализа вычислять или предвычислять ход этих явлений в тех или иных конкретных условиях.

Необходимо подчеркнуть, что разрешение всех этих теоретических проблем физики не стало монополией физиков-теоретиков. Всякий крупный физик-экспериментатор является по существу и теоретиком, ставящим и разрешающим теоретические вопросы. Точно так же в решении таких проблем теоретической физики, которые упираются, главным образом, в сложные математические расчёты, принимают попрежнему участие специалисты-математики.

В тех случаях, однако, когда вопрос, интересующий физика-экспериментатора, имеет слишком комплексный характер, т. е. связан с явлениями, не входящими непосредственно в изучаемую им область, решение его предоставляется обычно физику-теоретику. Преимущество физика-теоретика перед экспериментатором заключается именно в том, что теоретик, как правило, хорошо ориентируется в гораздо более широком круге физических явлений, относящихся к различным областям экспериментальной физики.

Широта физического образования часто обусловливает также преимущество физика-теоретика перед математиком при решении сложных физических проблем математического характера: не понимая надлежащим образом сущности рассматриваемых явлений, математик обычно бывает склонен искать точное решение там, где можно ограничиться сравнительно простым приближённым решением, получаемым в результате разумного, т. е. не изменяющего существа дела, упрощения задачи.

Таким образом, если отрицательной характеристикой физика-теоретика является неумение ставить физические эксперименты, то положительной характеристикой является широкая энциклопедичность в вопросах физики, соединённая с достаточной математической вооружённостью.

В зависимости от соотношения между этими двумя факторами физик-теоретик может приближаться по своему профилю либо к физику-экспериментатору, либо к математику. Теоретики первого «экспериментального» типа занимаются преимущественно различными конкретными физическими или физико-химическими вопросами, волнующими экспериментаторов, с которыми они находятся в тесном контакте. Теоретики второго—математического—типа занимаются обычно абстрактными вопросами, или же решением специальных математических задач, связанных с явлениями, вполне выясненными в принципиальном отношении, но требующими точного количественного описания. Последняя область обычно выделяется в особую специальность, называемую «математической физикой». Представители её являются скорее математиками, чем физиками; отнесение их к той или иной категории имеет сугубо условный характер и зависит от того, какими вопросами, помимо вышеуказанных, они занимаются—чисто математическими или физическими.

Установив, таким образом, место теоретической физики и её представителей в общей системе физико-математических дисциплин,

мы можем вернуться к теме данной статьи — о развитии теоретической физики в нашей стране за последние 30 лет.

В дореволюционной России теоретическая физика как самостоятельная дисциплина, была представлена слабо, что объясняется очень слабым развитием физики и техники в дореволюционный период. Великая Октябрьская социалистическая революция, поставившая задачу превращения экономически и культурно отсталой страны в передовое индустриальное государство, естественно, вызвала бурное развитие физики как основы техники и создала, таким образом, важнейшую предпосылку для возникновения советской теоретической физики.

Выдающуюся роль в создании теоретической физики в России сыграл в начале второго десятилетия XX в. П. С. Эренфест, в то время работавший в Петербурге (впоследствии—преемник Г. А. Лоренца на кафедре теоретической физики в Лейдене).

На почве старой царской России ростки новой дисциплины, вероятно, скоро бы захирели. На обновлённой почве Советской России они привились и стали разрастаться, сначала медленно, ввиду крайней малочисленности первого отряда советских физиков-теоретиков, а затем, по мере роста этого отряда и развития экспериментальной и технической физики в нашей стране, всё быстрее и быстрее. В дальнейшем мы остановимся на важнейших направлениях работы советских физиков-теоретиков.

2. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Первая существенная работа по эйнштейновской теории относительности и тяготения была сделана у нас в 1923 г. покойным А. А. Фридманом, который показал, что космологические выводы из этой теории не ограничиваются замкнутым статическим миром Эйнштейна или Шварцшильда, но имеют гораздо более общий характер, совместимый с монотонным (или периодическим) изменением радиуса кривизны мирового пространства с течением времени.

Работа Фридмана имела большое значение не потому, что она выдвигала новую космологическую теорию, более правильную, чем предыдущие, а потому, что она подрывала принципиальные основы прежних статических теорий, считавшихся ранее чуть ли не логическим следствием общей теории относительности.

Сам Эйнштейн пытался сначала оспаривать выводы Фридмана, но, в конце концов, вынужден был согласиться с ними.

Работу Фридмана можно рассматривать как своего рода дискредитацию космологических теорий, базировавшихся на общей теории относительности и тяготения, т. е. как доказательство невозможности вывести из неё однозначным образом правильную космологическую теорию, что с философской точки зрения представляется весьма важным результатом.

Другой весьма крупной работой по эйнштейновской теории относительности и тяготения является работа В. А. Фока, опубликованная им в 1939 г. и посвящённая приближённому решению проблемы *n* тел (материальных точек). При этом Фок показал, что не только ньютоновский закон взаимного притяжения между этими телами, но и ньютоновский закон движения каждого из них под влиянием остальных, может быть выведен из общих уравнений гравитационного поля, не прибегая к каким-либо добавочным принципам. Следует напомнить, что в первоначальной формулировке теории Эйнштейна движение какого-либо тела в заданном внешнем поле определялось как движение по геодезической линии, т. е. по прямейшей (или кратчайшей) линии в искривлённом четырёхмерном мире; это определение представляло собой, следовательно, обобщение принципа инерции. Таким образом, Фоку удалось показать, что в общей теории относительности принцип инерции не имеет самостоятельного значения и может быть нацело сведён к законам, определяющим гравитационное поле в зависимости от положения и движения создающих его — и движимых им — материальных тел. Этот результат напоминает основной результат лорентцовой динамики электромагнитного поля, содержащего электроны, заключающийся в том, что сила инерции каждого электрона трактуется как результирующая электромагнитных сил, с которыми действуют друг на друга элементы его электрического заряда; при этом уравнение движения электрона в заданном внешнем поле сводится к равенству нулю полной силы, которую он испытывает (т. е. суммы внешней силы и силы электромагнитного «самовоздействия»), что эквивалентно принципу сохранения энергии и количества движения поля.

Фок не ограничился первым, наиболее грубым приближением в решении уравнений задачи *n* тел, но рассмотрел также поправки к ньютоновским законам взаимодействия и движения, которые вытекают во втором приближении из эйнштейновской теории относительности.

Несколько позже Фока и независимо от него совершенно аналогичные результаты были получены самим Эйнштейном в сотрудничестве с Гофманом и Инфельдом.

Существенным вкладом в развитие эйнштейновской теории является также работа покойного Г. А. Манделя (1930 г.), который показал, что путём присоединения к четырём измерениям пространственно-временного мира ещё одного, особого, пятого измерения можно достигнуть формального объединения гравитационного и электромагнитного полей *). Необходимо отметить, что подобное объединение гравитационных и электромагнитных эффектов в «единую теорию поля» выставлялось Эйнштейном в качестве одного из

*) Несколько позже Манделя аналогичная теория была развита за границей Калюза.

важнейших пунктов программы дальнейшего развития теории относительности.

Гораздо многообразнее работы советских теоретиков в области второй теории, под знаменем которой совершалось развитие современной атомной физики—именно теории квантов и квантовой теории атомных явлений.

Работы эти относятся, главным образом, к дальнейшему развитию той обновлённой и углублённой формы теории квантов, которую она получила в 1925 — 1928 гг. после работ Гейзенберга, де-Брогля, Шредингера и Дирака.

Здесь следует упомянуть прежде всего ряд работ, связанных с дальнейшим обобщением квантовой механики в сторону общей теории относительности, со включением в уравнения Дирака членов, учитывающих гравитационные силы (работа Иваненко о матричной геометрии, в дальнейшем развивавшаяся другими исследователями, работа Иваненко и Фока о «параллельном переносе» спиноров и, в частности, волновой функции уравнения Дирака, в смысле общей теории относительности, 1929 г.).

К той же серии работ по релятивистской формулировке законов квантовой механики (в пределах, однако, специальной теории относительности) относятся работы Фока (отчасти совместно с Дираком и Подольским) по релятивистской трактовке задачи о многих электронах в связи с применением принципов квантовой механики к электромагнитному полю. При этом оказывается возможным вывести как законы изменения этого поля, так и законы движения электронов, его создающих, из одного уравнения, трактуя поле и электроны как две взаимодействующие части одного целого.

Как впервые показал Дирак, число электронов, взаимодействующих с квантованным электромагнитным полем, может изменяться при одновременном появлении или исчезновении позитронов. В. А. Фок ввёл для описания этих явлений изящный и удобный математический формализм, использующий понятие о функционалах, — формализм, который может применяться и к другим аналогичным явлениям.

3. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНЫХ ЯДЕР

Наиболее существенные и многочисленные вклады советских физиков-теоретиков в разработку квантовой теории сделаны, главным образом, в области её применений к различным конкретным задачам, относящимся к свойствам элементарных частиц и образованных ими материальных тел.

Проблема элементарных частиц ставится в квантовой механике совсем по-иному, чем в механике классической. Прежде всего, свойства этих частиц оказываются скрытыми в формализме описывающих их уравнений гораздо глубже, чем в классической теории. Так, на-

пример, пишущий эти строки, исходя из своей прежней релятивистской, но не квантовой теории вращающегося электрона, предложил в 1928 г. описывать соответствующие электронам волны системой уравнений, являющихся непосредственным обобщением уравнений Максвелла для световых волн.

Почти одновременно Дирак решил вопрос об электронных волнах своим знаменитым уравнением, в которое входили величины нового спинорного («полувекторного») типа. А в 1937 г. французский физик Прока показал, что обобщённые уравнения Максвелла описывают не электроны, но новооткрытые частицы—мезоны, обладающие тем же зарядом, что и электроны, но большей массой и, главное, целочисленным спином (и, следовательно, подчиняющиеся статистике Бозе, а не Ферми).

Дирак показал в 1932 г., что состояния с отрицательной кинетической энергией или массой, в которых могут находиться электроны, описываемые найденным им уравнением, могут быть интерпретированы, если допустить, что почти все эти состояния заняты электронами и обнаруживаются при своей вакантности в виде позитронов, открытых экспериментально Андерсоном.

И. Е. Тамм, основываясь на теории Дирака, первый провёл ряд интересных расчётов, относящихся к явлению аннигиляции, т. е. взаимного уничтожения, электронно-позитронных пар с образованием фотонов, а также к возникновению и исчезновению подобных пар на промежуточном этапе при рассеянии света свободными электронами. Эта работа содержала в зародыше различные нелинейные эффекты, связанные с теорией Дирака и основанной на ней электродинамике. Сюда относятся возникновение электронно-позитронных пар при столкновении заряженных частиц (Ландау и Лифшиц), рассеяние света на положительных ядрах путём возникновения и исчезновения подобных пар (Ахиезер и Померанчук), рассеяние света на свете (Ахиезер) и ряд других эффектов.

К этим вопросам примыкают также расчёты эффективных сечений при различного рода столкновениях между элементарными частицами.

Относящиеся сюда вычисления, в которых в последнее время изощрялись, в особенности, молодые советские теоретики, весьма сложны и требуют превосходного владения математическим аппаратом квантовой механики. Некоторые из них, связанные с преодолением принципиальных затруднений (например, работы Иваненко и Соколова, а также Гинзбурга по вопросу об устранении бесконечных эффективных сечений при рассеянии мезонов на ядерных частицах), представляют не только математический, но и принципиальный интерес.

Оставляя в стороне ряд работ чисто вычислительного характера, мы должны отметить, далее, проделанную рядом советских «квантистов» работу по теории взаимодействия элементарных частиц. Новый путь в этом направлении был проложен Дираком, который

показал, что кулоновское взаимодействие между электронами может быть формально описано (при расчётах по методам теории возмущений) как результат «перекидывания» фотонами (фотон, испускаемый одной частицей и поглощаемый другой, как бы осуществляет взаимодействие между ними). И. Е. Тамм, а менее подробно также Д. Д. Иваненко (1935 г.), показали, что, пользуясь этим методом и заменяя фотоны электронно-нейтриновыми парами, которые, согласно теории Ферми, испускаются при β-распаде радиоактивных ядер, можно в принципе описать взаимодействие между ядерными частицами. Правда, полученные результаты оказались мало удовлетворительными. Однако они в дальнейшем были улучшены японским теоретиком Юкава, который объединил электронно-нейтриновую пару в одну более тяжёлую частицу, массу которой ему удалось определить приближённо из радиуса действия ядерных сил. Эта гипотетическая частица, совпадающая по всем признакам с найденным позже мезоном, способна спонтанно распадаться на электрон и нейтрино. Этот процесс наблюдается в космических лучах. По теории космических лучей советским квантистам также принадлежит ряд интересных работ, особенно по теории ливней, где И. Е. Тамму и Л. Д. Ландау, а также Д. Д. Иваненко и А. А. Соколову (1938 г.) и в последнее время (1946 г.) Тамму и Беленькому удалось получить математически точные решения.

Возвращаясь к вопросам ядерной физики, исследованным или решённым советскими теоретиками, мы должны отметить высказанную Д. Д. Иваненко в 1934 г. идею о том, что сложные атомные ядра не содержат электронов, но состоят из протонов и нейтронов. Ещё раньше — в 1932 г. — Иваненко выдвинул мысль о том, что появляющиеся при β-превращениях электроны не вылетают в готовом виде из ядер, а возникают при изменении заряда последних, подобно тому как фотоны возникают при переходе атомов из одного состояния в другое с меньшей энергией.

Эти идеи, несколько позже развитые Гейзенбергом, составляют основу современной теории строения атомных ядер.

Существенное значение для описания процессов возбуждения и распада сложных ядер имеют представления о температуре ядра, его нагревании при поглощении протона, нейтрона или какой-либо другой частицы и о последующем испарении, высказанные автором в 1936 г., после опубликования работы Бора о связи между частицами в сложном ядре. Эта статистическая теория получила также интересное развитие в работах Ландау по густоте уровней в ядре, которую он оценил путём применения к последнему статистики Ферми.

Тотчас же по опубликовании работы сообщений о делении ядер урана под влиянием медленных нейтронов мной (в 1939 г.) была развита теория электрокапиллярного деления этих ядер, основанная на представлении Бора о сложных ядрах как о капельках

особого рода жидкости и аналогичная рэлеевской теории дробления наэлектризованных капель проводящей жидкости. Эта теория позволяет объяснить то обстоятельство, что периодическая система элементов обрывается на уране; впрочем, для этого теорию электрокапиллярного деления пришлось дополнить теорией, определяющей, на основании статистики Ферми, нормальное соотношение между зарядом и массой ядра, т. е. между числом образующих его протонов и нейтронов, обеспечивающее его устойчивость по отношению к β-превращениям. Аналогичные соображения, в значительно более разработанной форме, были развиты несколько позже Бором и Уилером.

Деление ядра урана или, точнее, его лёгкого изотопа («актиноурана») под влиянием захвата медленного нейтрона сопровождается, как известно, появлением 2—3 новых, более быстрых, нейтронов. Таким образом, оказывается обеспеченной предпосылка для развития цепной реакции взрыва большой массы актиноурана.

В обычном уране подобный взрыв не может иметь места, так как атомы основного тяжёлого изотопа, захватывая нейтроны, не расщепляются, но претерпевают последовательно два β-превращения, приводящих к образованию плутония. Особенно «жадно» они захватывают нейтроны с энергией около 25 *в*. В весьма интересной работе, опубликованной в 1940 г., Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон показали, что достаточно относительно небольшого обогащения обычного урана его лёгким изотопом для того, чтобы обеспечить возможность цепной реакции, приводящей к лавинообразному возрастанию числа нейтронов.

Из других работ советских физиков по теории ядерных процессов следует упомянуть о работе В. Б. Берестецкого и А. Б. Мигдала по кинетике деления ядра урана, в связи с критикой вычислений Бора и Уилера, а также работу автора, пытавшегося объяснить характерную для этого деления асимметрию (неодинаковость массы обоих осколков), исходя из представления о туннельном эффекте.

К теоретическим достижениям советских физиков можно также отнести открытие Русиновым и Юзефовичем явления ядерной изомерии или, вернее, интерпретацию этого явления как результата перехода ядра в возбуждённое метастабильное состояние. Ряд молодых теоретиков, в особенности Берестецкий и Завелевич, немало потрудились над расчётом вероятности электронной конверсии при переходе из метастабильных состояний в нормальное, т. е. отдачи избыточной энергии ядра одному из ближайших электронов окружающей его оболочки.

Теория ядерных процессов находится в настоящее время в зачаточном состоянии. Развитие её требует углубления наших знаний о природе элементарных частиц материи, их взаимных превращени-

ях, их появлении и исчезновении. Эти метаморфозы элементарных частиц представляют собой явления совершенно нового типа, исключавшиеся в классической физике, где принцип сохранения материи сводится к принципу неизменности её элементарных частиц. Следует также упомянуть новую работу автора (1945 г.), в которой показывается, что с точки зрения теории относительности сложные частицы должны трактоваться как материальные точки с внутренними степенями свободы и, в принципе, не могут быть описаны как совокупность более простых частиц.

4. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

Несовершенная и незаконченная форма современной квантовой теории вполне достаточна в качестве принципиальной основы для практически безукоризненного и исчерпывающего объяснения всех физических явлений, не затрагивающих целости атомных ядер. В этом отношении современная квантовая механика играет такую же роль, как механика Ньютона с её законом всемирного тяготения и законами движения по отношению к проблемам небесной механики. Несмотря на всю принципиальную грандиозность той перестройки, которой теория Ньютона подверглась у Эйнштейна, в применении к вопросам движения небесных тел, ввиду их сравнительно небольших относительных скоростей, теория Эйнштейна даёт результаты, практически (в пределах точности обычных астрономических наблюдений) не отличающиеся от результатов, вытекающих из теории Ньютона.

Поскольку электроны в атомах и молекулах имеют скорости, далёкие от скорости света, поведение их может быть описано с вполне достаточной даже для спектроскопии точностью нерелятивистской квантовой механикой Гейзенберга-Шредингера, в крайнем случае с введением релятивистских поправок, которые могут быть заимствованы из приближённой формы уравнения Дирака и уравнений квантовой электродинамики.

Основываясь на этой приближённой и, по существу, предварительной форме законов квантовой механики, можно, в принципе, дать исчерпывающее объяснение всех физических, физико-химических и химических свойств атомов, молекул и материальных тел, а также установить теоретически характер и закономерности всевозможных явлений, разыгрывающихся в них (и не нарушающих целости атомных ядер).

Не следует думать, что решение всех этих вопросов сводится к чисто математической задаче — интегрированию уравнений квантовой механики для рассматриваемой совокупности неизменных частиц (ядер, электронов).

При большом числе частиц такая задача является практически совершенно неразрешимой. Дело физика-теоретика заключается в том, что-

бы заменить её несравненно более простой математической задачей, допускающей фактическое решение, а вместе с тем сохраняющей достаточную степень сходства с оригиналом по всем важнейшим признакам.

Советские физики-теоретики имеют немало заслуг в изучении на основе квантовой механики такого рода объектов, начиная от простейших атомов и кончая кристаллическими телами, с охватом всевозможных электрических, магнитных и оптических явлений, которые обусловливаются взаимодействиями электрических зарядов электронов и ядер.

Здесь нужно прежде всего упомянуть работы В. А. Фока по расчёту распределения электронов в сложных атомах и строению их спектров, основанные на применении метода самосогласованного поля, введённого Хартри и усовершенствованного Фоком с учётом эффекта квантового обмена. Можно также отметить несколько работ, посвящённых вопросам «квантовой химии», т. е. расчёту строения и свойств простейших молекул. Однако, наиболее существенные и многочисленные работы советских теоретиков по применению квантовой теории к вопросам строения и свойств материи относятся не к атомам и молекулам, а к твёрдым телам, в особенности к металлам, а также диэлектрикам и полупроводникам.

Из работ по теории металлов я позволю себе отметить, прежде всего, свои собственные исследования, как хронологически наиболее ранние. Ещё перед самой революцией — в начале 1917 г. — мной была дана теория скачков потенциала в поверхностном слое металлов, а также их поверхностного натяжения, на основе представлений боровской квантовой теории строения атомов. В 1925 г. эти представления были обобщены мной на движение так называемых свободных электронов в металлах, причём впервые было показано, что кинетическая энергия этих электронов, вопреки представлениям классической теории Друде, практически не зависит от температуры, но определяется чисто квантовыми условиями, связанными с тем, что характер орбитального движения валентных электронов около отдельных атомов частично сохраняется, дополняясь последовательным переходом их от одних атомов к соседним (в чём и заключается их «освобождение» или, вернее, коллективизация).

В этой же работе была впервые вычислена на указанной основе электропроводность металлов; однако эта первая теория электропроводности, несмотря на то, что она приводила к правильным результатам, оказалась, по существу, неправильной, так как основывалась на использовании эйнштейновского соотношения между подвижностью и коэффициентом диффузии, предполагающем применимость законов классической статистики.

Наконец, в этой работе была дана теория сил сцепления в металлах, основанная на притяжении положительных ионов омывающей и пропитывающей их «электронной жидкостью». Правильная и логи-

чески последовательная теория металлической проводимости, основанная на представлении о рассеянии электронных волн тепловыми флюктуациями плотности металлов в соответствии с принципами волновой механики Шредингера, была дана мной в 1927 г. В 1928 г. после появления работ Ферми, Паули и Зоммерфельда по квантовой статистике электронного газа я модернизировал свою старую теорию двойного электрического слоя на поверхности металлов, а также развил теорию релятивистского вырожденного газа и показал, что давление его может обеспечить равновесное состояние вещества в звёздах, при учёте сил тяготения, но только в звёздах ограниченной массы, близкой к массе Солнца.

Эта работа нашла своё дальнейшее развитие у Л. Д. Ландау, который показал, что при увеличении массы звёзд и увеличении энергии электронов последние должны захватываться протонами, превращая их в нейтроны, что, в конце концов, может привести к образованию сверхплотного нейтронного «ядра» звёзд. Таким образом оказывается возможным до некоторой степени восстановить старую теорию о том, что энергия, излучаемая сверхплотными звёздами карликовых размеров, черпается за счёт энергии сил тяготения *).

Исходя из рассмотрения квантовомеханического эффекта электронного обмена в отдельных атомах и в металлах, я выдвинул в 1927 г. общепринятое ныне представление о происхождении спонтанного намагничения в некоторых металлах. В 1930 г., совместно с Я. Г. Дорфманом, мной было впервые дано объяснение того факта, что ферромагнитные тела стремятся разбиваться на «домены», т. е. области с различными, в среднем компенсирующимися, направлениями спонтанного намагничения (вследствие борьбы размагничивающих магнитных сил и намагничивающих обменных сил).

Две фундаментальные работы по теории магнетизма были опубликованы Л. Д. Ландау.

В первой из них (1930 г.) он показал, путём применения квантовой механики к модели электронного газа в металлах, что этот газ, в противоположность выводам классической теории, обладает диамагнетизмом, составляющим одну треть спинового парамагнетизма, найденного Паули. Во второй работе (совместно с Лифшицем) Ландау дал полную теорию разбиения одноосного ферромагнетика на плоские домены, параллельные оси лёгкого намагничивания, учтя при этом энергию анизотропии, которая совершенно игнорировалась в теории Дорфмана и моей. Следует отметить замечательный факт, вытекающий из обеих теорий и подтверждаемый на опыте, что размеры доменов зависят от размеров всего тела. Ландау и Лифшиц в своей работе также распространили теорию намагничения на случай

*) В случае обычных звёзд излучение обеспечивается энергией, выделяющейся при синтетических ядерных реакциях (в особенности превращения водорода в гелий), которые протекают в недрах звёзд при температурах порядка десятков миллионов градусов.

переменных магнитных полей, вычислив зависимость магнитной восприимчивости от частоты колебаний.

Фундаментальное значение для развития учения о ферромагнетизме и в особенности технической кривой намагничения имела феноменологическая теория Акулова (1930 г.) о явлениях магнитной анизотропии и магнитострикции (использованная частично и в только что упомянутой работе Ландау-Лифшица). В дальнейшей разработке теории технической кривой намагничения путём перемещения границ между доменами и вращения вектора спонтанного намагничения, с учётом влияния внутренних и внешних упругих напряжений, весьма существенное участие приняли советские физики С. В. Вонсовский и, в особенности, Е. И. Кондорский.

Большое принципиальное значение имеет полярная модель металлов, и, в частности, ферромагнитных металлов, разработанная в 1934—1935 гг. С. П. Шубиным и С. В. Вонсовским, основанная на модельном представлении об «электронных парах» и «дырках», наличием которых объясняется электропроводность металлов и разные аномалии в поведении ферромагнетиков. В этой теории переход части электронов с одних атомов (превращаемых в «дырки», т. е положительные ионы) к другим (превращаемым в «двойки», или отрицательные ионы) предполагался спонтанным, т. е. не зависящим от температуры и связанным с уменьшением полной энергии системы.

5. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ИЗОЛЯТОРОВ

Совершенно аналогичные представления были введены мной несколько раньше (1932 г.) в теорию электронных полупроводников, с той лишь разницей, что в этом случае рассматриваемый переход, приводящий к образованию подвижных электронов и положительных «дырок», требует затраты энергии и поэтому совершается лишь под влиянием теплового движения.

Понятие о подвижных «дырках» было впервые введено мной в 1926 г. в связи с изучением нарушений правильности в строении ионных (солеобразных) кристаллов при повышении температуры и обусловленной этими нарушениями электропроводностью. Представление о том, что последняя объясняется тепловой диссоциацией части ионов, т. е. срывом их из узлов кристаллической решётки, было высказано Иоффе в 1924 г. Количественная же разработка теории электрических свойств гетерополярных диэлектрических кристаллов на основе этого представления, дополненного представлением о подвижных ионных «дырках», была осуществлена мной. Ввиду большой массы ионов квантовые эффекты при этом не играют практически никакой роли, в то время как в случае электронных полупроводников роль их весьма существенна.

Возвращаясь к электронным полупроводникам, необходимо отметить прежде всего ряд важных работ советских физиков-теоретиков

по вопросам, связанным с прохождением электрического тока— электронного или дырочного—через контакт между двумя полупроводниками или между полупроводником и металлом. Сюда относятся в первую очередь работы Блохинцева, Давыдова и Пекаря (1937 г.) о контактном сопротивлении и об эффекте выпрямления тока, а также работы Пекаря и автора о возрастании проводимости полупроводников в сильных полях (эффект Пуля).

В основе теории Давыдова и Пекаря лежит представление о том, что изменение контактного сопротивления (и, в частности, асимметричное изменение, приводящее к выпрямлению) зависит от изменения концентрации электронов или дырок в сторону увеличения или уменьшения под влиянием внешнего электрического поля.

Интересные исследования были выполнены также по вопросам, связанным с внутренними свойствами полупроводников, зависимостью их проводимости от концентрации примесей (Френкель, 1940 г), по теории различных гальваномагнитных эффектов и в особенности по теории своеобразного эффекта, открытого Кикоиным и Носковым и заключающегося в появлении электродвижущей силы при одностороннем освещении полупроводниковой пластинки, помещённой в параллельное её плоскости магнитное поле. Качественное объяснение этого явления было дано мной, а количественная теория разработана Ландау.

Ландау, совместно с Компанейцем, дал статистическую или, вернее, кинетическую теорию немаксвелловского распределения скоростей между электронами в полупроводнике под влиянием сильного электрического поля, обусловливающего повышение средней энергии электронов.

Совершенно аналогичная теория для электронов в плазме газового разряда была развита голландским физиком Драйвестейном и затем разработана более совершенным образом Давыдовым. Последним была предложена весьма интересная теория электрического пробоя газов, основанная на представлении о ступенчатой ионизации атомов, т. е. ионизации атомов, предварительно возбуждённых (по крайней мере дважды) электронным ударом. Ввиду того что пробой твёрдых кристаллических диэлектриков внешним образом весьма сходен с пробоем газов, необходимо допустить, в случае справедливости представлений Давыдова, что и в кристаллах диэлектриков атомы могут не только ионизоваться, но переходить в возбуждённое состояние, без отрыва от них соответствующего электрона.

Исследуя этот вопрос в 1931 г., я показал, что состояние возбуждения может при этом перемещаться от одного атома к другому, подобно электрону или дырке, т. е. путешествовать по всему кристаллу, подобно элементарной частице, в соответствии с общими законами квантовой механики. Эти псевдочастицы были названы мной экситонами. При этом было показано, что поглощение света в кристаллах сводится к образованию экситонов, найдены «правила отбора»,

определяющие спектры поглощения света в диэлектрических кристаллах при низких температурах, и выяснен механизм превращения экситонов в фононы, т. е. в энергию теплового движения. В более поздней работе (1936 г.) мной была показана, далее, неприменимость вильсоновской схемы электронных уровней в полупроводниках к описанию нормальных и, отчасти, возбуждённых состояний диэлектрических кристаллов. К сожалению, это обстоятельство до сих пор ещё игнорируется многими физиками, что часто приводит их, при интерпретации фотоэлектрических явлений в диэлектриках и полупроводниках, к разного рода, по существу, фиктивным трудностям.

Интересные схемы электронных уровней в ионных кристаллах были предложены покойным П. С. Тартаковским. В чрезвычайно интересной работе, опубликованной в 1933 г., И. Е. Тамм показал, что, наряду с обычными уровнями, соответствующими движению электронов внутри кристалла, существуют дополнительные «поверхностные» уровни, соответствующие движению электронов по поверхности кристалла или, если угодно, закреплению на его поверхности.

Фундаментальное значение имеет также работа И. Е. Тамма и С. П. Шубина о внешнем фотоэлектрическом эффекте в металлах (1931 г.). В этой работе было показано, что фотоэффект складывается из двух составных частей — поверхностного, который обусловлен скачком потенциала на поверхности металла, и внутреннего, который зависит от периодических колебаний потенциала внутри металла.

Из других работ, связанных с оптическими явлениями в кристаллах (особенно диэлектриков), следует отметить работы Мандельштама и Леонтовича и, в особенности, И. Е. Тамма (1929 г.) по теории комбинационного рассеяния света в кристаллах, открытого в 1928 г. Мандельштамом и Ландсбергом.

При этом И. Е. Тамм впервые дал последовательную квантовомеханическую теорию этого процесса, установив зависимость стоксовых и антистоксовых компонент от температуры, и ввёл в физику представление о квантах звука или «фононах.».

Весьма большой интерес имеет работа И. Е. Тамма и И. М. Франка по теории эффекта, открытого Черенковым в лаборатории С. И. Вавилова и под его руководством,—своеобразного излучения, испускаемого прозрачным телом (твёрдым или жидким) при движении в нём электрона со скоростью, превышающей скорость распространения света в этом теле (аналог маховской ударной волны в акустике). Теория Тамма и Франка получила дальнейшее развитие в ряде работ В. Л. Гинзбурга.

Следует упомянуть также о работах М. А. Леонтовича по теории рассеяния света неравномерно нагретым телом, а также поверхностью жидкости и, в особенности, о работах Блохинцева и Антонова-Романовского по теории фосфоресценции кристаллов. Последний автор доказал экспериментально, что высвечивание фосфоров обусловливается рекомбинационным механизмом, который в зависимости

от концентрации положительных центров может иметь как бимолекулярный, так и мономолекулярный характер. Кроме того, Антонов-Романовский обосновал экспериментально представление о том, что тепловые электроны в кристалле имеют гораздо меньшую подвижность, чем электроны, обладающие большими энергиями (например, вырываемые светом, в первое время своего существования). Эта малая подвижность объясняется процессом «самоареста» или прилипания электронов в идеальной кристаллической решётке, правильность строения которой нарушается присутствием этих самых электронов, вызывающих деформацию решётки около тех атомов, через которые они проходят и на которых, в результате этой деформации, задерживаются.

Вопрос этот был впервые рассмотрен Л. Д. Ландау, который связывал его с явлением активации, необходимой, по его мнению, для процесса «связывания» электрона и исключающей возможность этого процесса при низких температурах, т. е. именно тогда, когда тенденция к этому связыванию, обусловленная сопутствующим уменьшением энергии, оказывается особенно сильно выраженной. Со статистической точки зрения этот вопрос был несколько позже рассмотрен мной в связи с различными явлениями в полупроводниках и, в особенности, диэлектриках, которые могут быть объяснены с этой точки зрения. При этом мной было указано, что аналогичное «связывание» должно иметь место в случае подвижных положительных дырок, а также в случае экситонов (ликвидация которых путём превращения их энергии в энергию фотонов оказывается, повидимому, возможной только при переходе через такое «связанное» состояние). Наконец, в самое последнее время С. И. Пекар дал строгую квантовомеханическую теорию связывания электронов в ионных решётках, для которых сопутствующее уменьшение энергии особенно велико. Ему удалось фактически вычислить эту энергию и применить полученные результаты к количественному объяснению многих интересных оптических свойств ионных кристаллов.

Из других исследований теоретического характера по физической оптике следует упомянуть об интересных работах С. И. Вавилова и его сотрудников (особенно Левшина) по люминесценции растворов, в которых были теоретически выяснены и экспериментально проверены различные стороны этого явления, в частности вопрос о тушении флюоресценции под влиянием различных факторов и её поляризации в зависимости от возраста раствора (точнее, растворителя).

Большой интерес имеют работы Власова и Фурсова по теории поглощения света в газах в связи со взаимодействием между атомами, и вытекающая отсюда форма спектральных линий в спектре испускания и поглощения газов. Эти работы представляют собой, повидимому, наиболее удачное решение данного вопроса.

К указанным выше работам по теории кристаллов относится также ряд работ И. Я. Померанчука и А. Ахиезера по квантовой тео-

рии магнитных и, в особенности, тепловых свойств кристаллов при низких температурах. В частности, Померанчуку удалось объяснить некоторые аномалии в тепловых свойствах ферромагнитных тел путём использования понятия о «магнонах», т. е. частицах, связанных со спиновыми волнами, которые были исследованы ранее Блохом в связи с теорией ферромагнетизма. Далее, Померанчук показал, что для объяснения конечной теплопроводности кристаллов необходимо рассматривать ангармонические эффекты, связанные с членами не только третьего порядка (как это предполагалось раньше), но и четвёртого порядка малости. Померанчуку принадлежит также первая теория рассеяния и диффракции медленных нейтронов в кристаллах, с учётом дополнительных эффектов, вызываемых наличием беспорядочно распределённых изотопов.

Последнее обстоятельство было несколько ранее принято во внимание И. М. Лифшицем в его теории рассеяния инфракрасных лучей ионными кристаллами. Наличие изотопов проявляется в этом случае в появлении, наряду с наиболее быстрыми резонансными колебаниями (остаточные лучи), колебаний меньших частот (соответствующих конечным длинам волн). Рассматриваемая работа интересна не только по своим результатам (относящимся также к влиянию посторонних примесей), но и в методическом отношении; И. М. Лифшиц разработал чрезвычайно удобный и изящный матричный метод расчёта разнообразных явлений, связанных с колебаниями кристаллической решётки. Несколько ранее тем же автором был опубликован ряд других интересных работ о нарушениях правильности в строении реальных кристаллов и твёрдых растворов, а также различных явлений, обусловленных этими нарушениями, в особенности при рассеяниях рентгеновых лучей.

6. ТЕОРИЯ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ И НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Одной из фундаментальных областей физики, которая была сдвинута с места советскими теоретиками, является теория жидкого состояния. Прежние теории исходили из сближения жидкого состояния с газообразным. В 1926 г. мной была впервые развита кинетическая теория жидкостей на основе представления о сходстве жидкостей, при температурах, близких к температуре кристаллизации, со свойствами соответствующих твёрдых тел. При этом мной была использована модель жидкости, объединяющая, в смысле характера теплового движения, свойства твёрдых тел, с одной стороны, и газов — с другой (комбинация колебательного движения около некоторых равновесных положений с перескоком из одних положений в соседние). Исходя из этого представления, можно построить количественную теорию (обычной) вязкости жидкостей, позволяющую объяснить наблюдаемую на опыте зависимость её от температуры и от давления.

Эту теорию удалось развить дальше, правда несколько формальным образом, в сторону молекулярно-кинетического объяснения механических, электрических и отчасти оптических свойств жидкостей (с анизотропными молекулами), связанных с разного рода релаксационными явлениями. Кроме того, кинетическая теория жидкостей позволила объяснить прерывный характер процесса плавления и кристаллизации, исходя из принципиальной непрерывности между твёрдым (кристаллическим) и жидким (аморфным) состояниями, при неустойчивости или отчасти метастабильности ряда промежуточных состояний (подобно тому, как это имеет место в теории Ван-дер Ваальса). С точки зрения современной кинетической теории жидкостей представляет большой интерес их «вторая», или «объёмная», вязкость, обнаруживающаяся весьма резким образом в связи с тем фактом, что поглощение звуковых и, в особенности, ультразвуковых колебаний в жидкостях бывает обычно во много раз, иногда даже в сотни и тысячи раз больше, чем то, которое вытекает из учёта обычной вязкости жидкостей, согласно теории Навье-Стокса. Факт этот с формальной точки зрения объясняется весьма просто тем обстоятельством, что жидкости обладают двоякого типа вязкостью, из коих одна (обычная) связана с тангенциальными усилиями, возникающими при изменениях формы (т. е. при обычном течении), а другая — с нормальными напряжениями, обусловленными изменениями объёма (плотности). Последнее обстоятельство, т. е. наличие у жидкостей объёмной вязкости, до последнего времени совершенно игнорировалось.

Полуфеноменологическая теория её происхождения в связи с различными релаксационными процессами в жидкостях была дана в 1935 г. М. А. Леонтовичем и С. Л. Мандельштамом, а также мной и Ю. А. Образцовым.

Упомянутые выше теории совершенно не учитывают квантовых эффектов, которые должны обнаруживаться при достаточно низких температурах. Единственной жидкостью, не замерзающей (при обычном давлении) даже при абсолютном нуле температуры, является жидкий гелий. Экспериментальные исследования ряда физиков и, в особенности, П. Л. Капицы обнаружили наличие у гелия при температурах ниже 2,19° К своеобразное явление сверхтекучести, которое Л. Д. Ландау удалось объяснить путём применения к этой жидкости новой квантовой гидродинамики, основанной на представлении о возможности совмещения в каждой точке жидкого потока двух различных скоростей — «мёртвого» или вырожденного гелия и «живого» невырожденного, в связи с представлением о существовании некоторой «щели», т. е. разрыва, в спектре энергии этого вещества. Эти парадоксальные идеи привели Ландау к предсказанию существования в жидком гелии II, наряду с обычными звуковыми колебаниями, связанными с колебаниями давления, колебаний второго рода, связанных, в основном, с колебаниями температуры (или энтропии). Теория эта, приведённая к более конкретной форме Е. М. Лифши-

цем, была затем блестяще подтверждена на опыте Пешковым. Несмотря на эти успехи, концепция Ландау в ряде отношений представляется спорной и, повидимому, может быть заменена менее парадоксальной концепцией, основанной на последовательном применении к гелию статистики Бозе (которой должны подчиняться его атомы). Последняя концепция развивалась ещё в 1937 г. Лондоном. Однако Лондону не удалось учесть взаимодействия между атомами жидкого гелия, который он трактовал как идеальный газ, ввиду чего намеченная им программа осталась невыполненной. Эту программу удалось недавно (в 1946 г.) выполнить советскому математику Н. Н. Боголюбову, который показал, что свойство сверхтекучести гелия может быть объяснено, исходя из статистики Бозе, при учёте преобладания сил отталкивания между атомами над силами притяжения. Этим, между прочим, можно было бы объяснить отсутствие сверхтекучести у жидкого водорода, молекулы которого характеризуются сравнительно большим сцеплением друг с другом. Явление сверхтекучести жидкого гелия внешне весьма сходно с явлением сверхпроводимости, наблюдаемым у ряда металлов и сплавов при очень низких температурах. Хотя удовлетворительной молекулярной теории сверхпроводимости до сих пор не существует, однако Л. Д. Ландау удалось показать, что переход сверхпроводящего сплава в обычное состояние (с нормальным электрическим сопротивлением) под влиянием магнитного поля осуществляется через ряд промежуточных состояний, которые характеризуются чередованием сверхпроводящих слоёв с постепенно утолщающимися (за их счёт) слоями с конечным сопротивлением. Существование этой слоистой структуры, напоминающей слоистое строение одноосных ферромагнетиков, было на опыте подтверждено А. И. Шальниковым.

7. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Наиболее отсталой областью современной теоретической физики является, как это ни странно, область явлений, наиболее, казалось бы, обыденных и понятных с качественной стороны, а именно — явлений, связанных с механическими свойствами твёрдых тел — кристаллических и поликристаллических. Сюда относится, например, проблема пластичности кристаллов, в которую до сих пор не удалось внести ясности, несмотря на ряд попыток.

Одной из таких попыток, относящихся к линейной модели кристалла, является работа автора совместно с Т. А. Конторовой (1937 г.), в которой была впервые решена задача о распространении дислокаций, лежащих, согласно Тэйлору, в основе пластической деформации.

Представляет интерес работа Конторовой о межкристаллических прослойках между сдвойникованными областями, совершенно аналогичная теории переходных зон между соседними доменами, т. е. областями спонтанного намагничения в ферромагнетиках.

Следует также отметить несколько работ того же автора, совместно со мной, по статистической теории прочности, а также Александрова и Журкова.

Более серьезные успехи были достигнуты, в частности, советскими физиками в вопросе о технической прочности твердых тел, т. е. о малости этой прочности по сравнению с теоретической прочностью, вытекающей из электронной теории междучастичных сил. Здесь следует в особенности отметить классические работы А. Ф. Иоффе, которому удалось объяснить дефицит прочности поверхностными трещинами, механизм возникновения которых остается, впрочем, до сих пор ещё не вполне выясненным, несмотря на обнадеживающие в этом отношении работы А. В. Степанова, который связывает их возникновение с предварительными пластическими деформациями.

В последние годы Степанов пытается развить новую теорию прочности твердых тел, связанную с представлением о зародышах разрушения, которые могут обратимо возрастать и уменьшаться, пока не достигнут некоторого критического размера, после чего наступает необратимое разрушение тела. В случае кристаллических тел характер этого разрушения существенным образом зависит от их анизотропии.

К аналогичным представлениям, независимо от Степанова, пришёл Гарбер в отношении процесса двойникования кристаллов. В последнее время основы количественной теории этих процессов были заложены И. В. Обреимовым и Е. М. Лифшицем.

8. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ТЕРМОДИНАМИКИ И СТАТИСТИКИ

Наряду с указанными выше специальными вопросами, советские теоретики имеют ряд существенных работ в области общих вопросов статистической и термодинамической теории материальных тел. Из относящихся сюда работ нужно прежде всего назвать работы Л. Д. Ландау по общей термодинамической теории фазовых превращений (1936 г.). Эти работы являются, пожалуй, наиболее крупным шагом вперёд в термодинамике гетерогенных систем со времени классических исследований Гиббса. Теория Ландау относится, впрочем, лишь к превращениям второго рода, связанным с точками Кюри (т. е. пиками теплоёмкости и коэффициента теплового расширения), в частности, к превращениям, характеризуемым исчезновением дальнего порядка в расположении частиц, и почти не касается превращений первого рода, связанных со скачкообразным изменением энтропии и объёма. Кроме того, Ландау не принимает во внимание флюктуаций (за исключением одной работы о сверхструктурных рентгеновских линиях в бинарных сплавах вблизи точек Кюри). Это обстоятельство существенным образом ограничивает физическую значимость его выводов, так как термодинамическая теория, игнорирующая флюктуации,

принципиально исключает как неустойчивые, так и метастабильные состояния, тогда как последние осуществляются и наблюдаются в действительности. Она приводит, между прочим, к физически не вполне оправданному противопоставлению кристаллических и жидких тел, несмотря на сохранение в последних ближнего порядка, который можно трактовать как флюктуации дальнего порядка или анизотропии, свойственной кристаллам.

В 1946 г. Н. Н. Боголюбов опубликовал две фундаментальные работы по основам статистической механики, связанные с развитием идеи о введении последовательности функций распределения частиц молекулярной системы — по одной, по две, по три и т. д. Эта идея высказывалась и ранее разными авторами, но не получала сколько-нибудь значительного математического развития. Боголюбов дал общий метод составления этой последовательности функций как для статистически равновесного состояния (описываемого обычно распределением Гиббса), так и для неравновесного (для которого общей теории до сих пор вовсе не существовало) и указал некоторые приближённые методы решения соответствующих уравнений для уже ранее исследованых случаев разреженных газов и разбавленных растворов электролитов. Я уверен, однако, что метод Боголюбова удастся применить и к более сложным конденсированным системам, в частности, к жидкостям *).

Следует также отметить несколько работ Б. И. Давыдова, посвящённых вопросу об увеличении энтропии молекулярных систем, в которых он пытается свести это увеличение к вмешательству экспериментатора при измерении энтропии (в соответствии с принципом неопределённости Гейзенберга). Соображения Давыдова безусловно интересны; однако мне лично они представляются весьма сомнительными.

Выше уже упоминались работы Давыдова по статистической кинетике, т. е. статистической теории необратимых процессов, связанных с приближением к равновесному состоянию. К этому же вопросу относятся некоторые работы Л. Д. Ландау, а также Л. Э. Гуревича, выпустившего целую книгу об «основах физической кинетики».

Большой принципиальный интерес представляют также работы молодого, безвременно скончавшегося в 1947 г. теоретика Н. С. Крылова, собранные в его докторской диссертации (но, к сожалению, до сих пор ещё не опубликованные), о новой общей теории необратимых процессов, не пользующейся вовсе понятием энтропии и ограничивающейся исследованием «распыления» точек, представляющих состояние рассматриваемой молекулярной системы в конфигурационном пространстве с течением времени.

---

*) Повидимому, аналогичный метод, независимо от Боголюбова, был несколько позже разработан Борном (в Англии). Следует заметить, что этот метод можно рассматривать как обобщение метода самосогласованного поля.

9. ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ, ГЕОФИЗИКА И АСТРОФИЗИКА

К работам по теоретической физике можно было бы отнести ряд интересных теоретических исследований А. Н. Фрумкина, Б. В. Дерягина, П. А. Ребиндера. В. Г. Левича и др. по различным вопросам молекулярной физики, в особенности в области капиллярных и электрокапиллярных явлений, а также работы Н. Н. Семёнова и Я. Б. Зельдовича по теории распространения горения и взрывов.

Однако эти исследования производились под знаменем физической химии или химической физики и реферируются в соответствующих статьях, ввиду чего мы можем лишь весьма бегло коснуться их в этом обзоре. А. Н. Фрумкину принадлежат фундаментальные работы по теории электрокапиллярной кривой и диффузного ионного слоя, обусловливающего явления электрокапиллярности, по образованию пузырьков пара (при кипении) или газа при электролитическом выделении, по скачку электрического потенциала в растворах электролитов.

Далее А. Н. Фрумкин дал термодинамическое обоснование явления расклинивающего действия тонких слоёв жидкости, открытого и экспериментально изученного Б. В. Дерягиным, который построил на его основе количественную теорию стабилизации и коагуляции коллоидов.

П. А. Ребиндер выяснил экспериментально и теоретически вопрос о понижении твёрдости под влиянием адсорбции поверхностно активных веществ и установил весьма важный для теоретического понимания структуры твёрдых тел факт существования в них микропористости (связанный, вероятно, с мозаичной структурой).

В. Г. Левич дал интересное решение вопроса о поверхностной вязкости адсорбированных слоёв, а также об успокаивающем действии тонких масляных плёнок на волнение водной поверхности.

Среди работ по теории поверхностных явлений отмечу также мою работу 1924 г. о теории явлений адсорбции и конденсации молекулярных пучков на поверхности твёрдых тел, в которой было дано количественное объяснение критической температуры конденсации; существование её было открыто Кнудсеном и изучено Семёновым и Харитоном.

Различные области науки, и в частности, физики не могут быть резко разграничены. Они так же непрерывно переходят друг в друга, как голова в туловище и туловище в руки и ноги. Поэтому расчленение физики на теоретическую физику и экспериментальную и выделение из неё вопросов физико-химического и даже «чисто» химического характера связаны с очень болезненными и уродливыми ампутациями. Следуя, однако, общепринятой классификации наук, мы не будем рассматривать дальнейшего развития советской теоретической физики в сторону физической химии и химии.

Я считаю, однако, необходимым прибавить несколько слов о работах советских теоретиков в области дисциплин, связанных с приме-

нением общих физических теорий к специальным явлениям — на земле и на небе, т. е. к геофизике и астрофизике.

Что касается геофизики, то здесь на первом месте следует отметить работы Кибеля по теоретическому прогнозу погоды, исходя из развитых им методов приближённого решения уравнений гидродинамики атмосферы. В последнее время, в связи с установлением ряда центров активности атмосферы, методы Кибеля дают возможность создания долгосрочных прогнозов на целый сезон. Далее, необходимо указать на работы В. В. Шулейкина, относящиеся отчасти к той же теме, а также к проблеме движения земных полюсов и, в особенности, к физике моря (включая несколько весьма интересных и оригинальных работ о механике движения рыб и других обитателей пресных и морских вод).

Советские теоретики добились за последнее время ряда важных результатов в области турбулентности и, в частности, атмосферной турбулентности (следует особенно отметить работы Обухова по этим вопросам).

Наконец, я должен упомянуть о новой теории явлений атмосферного электричества, которая была развита мной за последние 3 года, исходя из рассмотрения облаков, как аэрозоля, взвешенного в ионизованной атмосфере. Сюда же примыкает новая концепция о происхождении земного магнетизма в результате самовозбуждения электрических токов в жидком металлическом ядре земного шара (трактуемого как особого рода «турбогенератор»). Эта концепция была развита мной на основе аналогичной концепции, которую Л. Э. Гуревич и Лебединский развили для объяснения магнитного поля солнечных пятен.

Я уже упоминал выше о некоторых работах (своих и Ландау), относящихся к проблеме строения звёзд. К этому следует прибавить чрезвычайно интересные новые работы О. Ю. Шмидта о происхождении кратных звёзд, а также планетной системы, путём «захвата» одних небесных тел (в частности, метеоров) другими (например, растущими планетами).

10. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В заключение этой статьи мы рассмотрим вкратце развитие теоретической физики в СССР в сторону математики или «математической физики». Последняя, как правило, заключается в решении, на высоком математическом уровне, задач, в частности, технического характера, совершенно ясных с качественной стороны, но требующих точного количественного решения.

Наиболее крупные работы в этом практически весьма важном направлении, которое до сих пор ещё не получило у нас должного развития, принадлежат В. А. Фоку и Г. А. Гринбергу.

В 1927 г., развивая идеи, высказанные Н. Н. Семёновым и А. Ф. Вальтером, Фок дал исчерпывающую теорию теплового электри-

ческого пробоя диэлектриков (т. е. электрического пробоя, обусловленного их саморазогревом). Далее В. А. Фок разрабатывал теорию пробоя в кабелях (двух- и многожильных) и дал теорию скин-эффекта в кольце, воспользовавшись для этого тороидальными функциями. В. А. Фок обнаружил и исправил ошибку в известной теории Зоммерфельда о распространении радиоволн вдоль земной поверхности. Ему принадлежат блестящие работы математического характера по всевозможным вопросам физики и техники — от квантовой механики многоэлектронных систем до теории фотометрии или теории каротажа.

В последние годы (1945 — 1946) В. А. Фок занимался, в особенности, теорией распространения радиоволн вдоль земной поверхности.

При этом ему впервые удалось решить весьма трудную задачу, поставленную ещё Пуанкаре, об огибании радиоволнами поверхности земного шара, а также различных локальных неровностей этой поверхности.

Г. А. Гринберг проложил ряд новых путей в математической физике, систематически развивая и применяя к решению конкретных электростатических и магнитостатических задач мощные новые математические методы, основанные на использовании, с одной стороны, интегральных ур внений, связывающих электрическое и магнитное поле с поверхностными зарядами погружённых в него диэлектриков или намагничивающих тел, и, с другой стороны, теории интегральных преобразований типа преобразований Лапласа, лежащих в основе операционного исчисления (1937 г.). Аналогичные методы были применены им в последнее время с исключительным успехом к решению задач о распространении радиоволн вдоль земной поверхности при произвольном изменении электропроводности и диэлектрической постоянной с высотой или глубиной и притом не только для «плоской», но и для реальной шарообразной Земли (т. е. в гораздо более общих предположениях, чем в теории Зоммерфельда). Особенно интересный и изящный приближённый метод, основанный на использовании работ С. М. Рытова по теории скин-эффекта, был применён им для решения задач о «береговой рефракции» радиоволн, т. е. распространении их вдоль поверхности моря (идеально проводящей), ограниченной произвольными береговыми линиями (при конечной проводимости земной поверхности).

Наряду с теорией электромагнитного поля Г. А. Гринберг с большим успехом разрабатывал математическую теорию различных электронных и ионных приборов или, вернее, совершающихся в них колебательных процессов, преодолев ряд трудностей, перед которыми спасовали крупнейшие математики как у нас, так и за границей. В частности, им была впервые дана (совместно с Лукошкиным) теория разрезного магнетрона (1934 г.), цилиндрического диода с магнитным полем и начальных режимов в плоском диоде. Весьма интересная работа по этому вопросу была также сделана И. М. Лифшицем.

Из этой серии работ следует особенно отметить работу (1942 г.) о фокусировке катодных лучей в постоянных электромагнитных полях, в которой решается вопрос о выборе поля, обеспечивающего желаемый тип фокусировки. Эта работа представляет собой совершенно новую и свежую страницу в электронной оптике и будет несомненно иметь большое значение для практики.

Наконец, Г. А. Гринбергом, совместно с сотрудниками (Канторович и Лебедев), была решена задача о развитии во времени теплового пробоя конденсаторов, исследован и решён труднейший вопрос о коротком замыкании в маслонаполненном кабеле и ряд других кабельных задач.

Все эти исследования Г. А. Гринберга имеют весьма существенное значение для электротехники и радиотехники.

Следует также отметить ряд интересных работ учеников и сотрудников Г. А. Гринберга — Н. Н. Лебедева и М. О. Канторовича — по теории диффракции радиоволн с помощью методов, разработанных Гринбергом. К этому же вопросу относятся исследования Введенского, Мандельштама и Папалекси по распространению радиоволн вдоль земной поверхности, в которых некоторые новые результаты были получены использованием старых громоздких методов Зоммерфельда, Ватсона и др. иностранных исследователей (1940 — 1941 г.).

Важные для физики и техники работы по теории нелинейных колебаний были выполнены Л. И. Мандельштамом и его сотрудниками (в частности, А. А. Андроновым), а также Н. М. Крыловым и Н. Н. Боголюбовым (монография которых переведена на английский язык).

Наконец, необходимо указать на большую роль, которую сыграли для развития математической физики в нашей стране, а также для создания в ней школы прикладной математики и математической физики, работы А. Н. Крылова и, в частности, его капитальный труд «О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики, имеющих применения к техническим вопросам».