

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

53

ПЯТЬДЕСЯТ ЛЕТ СОВЕТСКОЙ ФИЗИКИ

Э. В. Шпольский

СОДЕРЖАНИЕ

I. Физика в России перед революцией и начало организации советской физики	197
II. Обзор работ советских физиков	212
Общие вопросы теоретической физики	212
Физика элементарных частиц	217
Физика атомного ядра	226
Физика плазмы	232
Оптика. Физика атомов и молекул	234
Квантовая электроника	247
Радиофизика и теория колебаний	251
Низкие температуры	256
Физика диэлектриков	261
Физика полупроводников	262
Механические свойства твердых тел	266
Магнетизм	268
Акустика	272
III. Организационные вопросы. Научная литература	273

I. ФИЗИКА В РОССИИ ПЕРЕД РЕВОЛЮЦИЕЙ И НАЧАЛО ОРГАНИЗАЦИИ СОВЕТСКОЙ ФИЗИКИ

Великая Октябрьская социалистическая революция открыла новую эпоху в развитии физики в России. Это наглядно показывает сравнение уровня развития физики в царской России с успехами этой науки в СССР в наше время. Однако независимо от этого детального сравнения единственное событие является ярчайшим доказательством выдающихся достижений советской науки. Это событие — запуск первого и второго искусственных спутников Земли в дни сорокалетия исторической даты Октября 1917 г. Это событие произвело во всем мире потрясающее впечатление, лучшим доказательством чего может служить тот факт, что русское слово «спутник» вошло без изменения во все языки мира, а сама дата запуска первого спутника часто рассматривается в зарубежных странах как начало новой эры в организации науки и научного образования. Но, конечно, рост физики в СССР во всех ее разделах, включая овладение в кратчайший срок ядерной энергией и ее всевозможными применениями, является хотя и не столь концентрированным, но не менее убедительным свидетельством замечательных достижений советской науки в области физики. Интересно и поучительно поэтому сравнить на фоне развития мировой науки масштаб и общий характер дореволюционной физики в России с физикой Советского Союза в наши дни.

Примерно семьдесят лет назад в физике начался тот глубокий переворот, который развернулся в последующее десятилетие и определил направление и характер развития этой науки на многие годы, возможно, на столетия вперед. Вспомним основные факты и важнейшие определяющие черты этого переворота. В 1895 г. были открыты рентгеновские лучи, в 1896 г. — радиоактивность. Хотя существование электрона предвиделось уже в середине семидесятых и восьмидесятых годов XIX столетия, исчерпывающее доказательство его реальности, определение его заряда и массы было дано в 1898 г. — событие для того времени, вероятно, не менее ошеломляющее, чем открытие рентгеновских лучей и радиоактивности. Исследование броуновского движения в начале XX столетия сообщило представлению об атомах и молекулах вещества столь же «ощутимую» реальность, как и реальность окружающих нас макроскопических предметов. Наконец, открытие интерференции рентгеновских лучей в 1912 г. подтвердило с новой стороны самым наглядным образом реальность атомов и открыло путь для изучения строения кристаллов. Вместе с тем было положено начало исследованию строения атома — сначала в виде модели Дж. Дж. Томсона, оставленной после открытия Резерфордом в 1912 г. атомного ядра.

Как итог развития физики XIX столетия, экспериментальной и теоретической, на рубеже столетий и в первые годы XX столетия возникли те важнейшие физические теории, которые определяют весь характер физики в наши дни и на многие будущие годы. Это — теория квантов, теория относительности и физическая статистика.

Посмотрим теперь, что же было в России в эту замечательную в истории физики эпоху. Отметим прежде всего, что в сопредельных с физикой науках — в химии и математике — в XIX и в начале XX столетия в России были сделаны открытия, по своему значению и преобразующему, революционизирующему влиянию далеко выходящие за пределы собственной науки. Достаточно напомнить в химии — открытие периодической системы элементов Менделеевым и замечательные работы химиков-органиков — Зинина, Бутлерова, Марковникова, Зелинского и ряда других, создавших для органической химии в России высокий авторитет, как в области синтеза (Зинин, Зелинский и др.), так и в области теории строения (Бутлеров). Выдающийся авторитет математике в России в конце XIX и в начале XX в. создали такие ученые, как Остроградский, Чебышёв, Ляпунов, Стеклов. В астрономии В. Я. Струве, Бредихин и Белопольский создали Пулковской обсерватории мировой авторитет. Наконец, в области кристаллографии, которая является с современной точки зрения основой физики твердого тела, навсегда прочно вошли в науку работы Е. С. Федорова, построившего общепринятую в настоящее время классификацию кристаллических систем.

Судьба физики в России была иной. Конечно, можно назвать ряд имен выдающихся русских ученых, которым физика обязана важными исследованиями (Столетов, Лебедев, Умов, Голицын и др.). Но в то время как математика в России к концу XIX столетия насчитывала 150 лет непрерывного плодотворного развития, в истоках которого блистало имя гениального Леонарда Эйлера, а в первой половине XIX столетия — имя математического гения Н. И. Лобачевского, физика в России была наукой гораздо более «молодой» и не могла сопоставить перечисленным великим ученым в какой-либо мере эквивалентные по своему значению имена. Анализ причин этого неблагоприятного для физики положения не входит в задачу настоящего очерка. Однако невольно обращает на себя внимание тот факт, что единственной чисто исследовательской лаборато-

рией без учебных функций в России с XVIII века практически до начала революции была только небольшая физическая лаборатория Академии наук в Петербурге (до 1912 г. носившая название «Физический кабинет», которое, очевидно, соответствовало объему ее деятельности *)). Но именно в этой небольшой лаборатории работал В. В. Петров, открывший вольтовую дугу за несколько лет до Дэви; здесь были выполнены все работы Э. Х. Ленца, по праву принадлежащего к числу основателей современного учения об электромагнетизме наряду с Эрстедом, Ампером и др. Здесь же работал Б. С. Якоби, который был ярким представителем еще только нарождавшейся технической физики. С. И. Вавилов **) характеризует этого выдающегося, но, к сожалению, полузабытого ученого следующим образом: «Якоби — один из самых замечательных представителей той новой фазы в истории физики, когда ее результаты сразу же в виде действенного фактора переходили в технику, электромагнетизм превращался в электротехнику». Из ученых конца XIX и начала XX столетия, работавших в этой лаборатории, следует упомянуть О. Д. Хвольсона и особенно Б. Б. Голицына, выполнившего здесь ряд тонких оптических работ, а под конец жизни целиком перешедшего к сейсмологии, где его работы являются основополагающими.

Уже из этого самого беглого очерка видно, что этот скромный «Физический кабинет», в котором академики в XVIII и XIX веках «обычно в одиночестве или только с ассистентом вели свои эксперименты» (С. И. Вавилов), внес существенный вклад в науку. Это произошло, несомненно, потому, что задачи этого кабинета-лаборатории состояли только в научных исследованиях, которые и были соответственным образом обеспечены материально.

Правда, кроме этой лаборатории, в Петербурге имелась Главная палата мер и весов, директором которой в конце своей жизни был Д. И. Менделеев. Но это было хотя и поставленное на высоком научном уровне, но чисто метрологическое учреждение.

В основном же физика в России была наукой университетской. Это значит, что университеты, или вообще высшая школа, должны были обеспечить не только преподавание, но и научные исследования в области физики. Но физика — наука экспериментальная. Она требует для правильной постановки преподавания, и особенно для исследовательской работы, обширных и специально приспособленных лабораторных помещений, соответствующей технической базы, оборудования нередко дорогими приборами и, наконец, для ученых в качестве столь же важного фактора — достаточного количества свободного от преподавательской работы времени. Ни одно из этих условий не было удовлетворено в русских университетах до самого начала XX века, а главное — со стороны правительства не было понимания важности развития в университетах физики как науки.

Факт крайне неблагоприятного положения физики в дореволюционной России с замечательной яркостью подчеркнут в приводимой ниже цитате из статьи одного из выдающихся физиков того времени профессора Московского университета Н. А. Умова. В статье «Физический институт Московского университета» Умов в 1898 г. писал ***): «Полити-

*) История развития этого учреждения, которое в сущности является своего рода эмбрионом современного гигантского Физического института Академии наук СССР (ФИАН), превосходно описана в книжке С. И. Вавилова «Физический кабинет — Физическая лаборатория — Физический институт Академии наук СССР за 220 лет», М., 1945.

**) Цит. соч., стр. 40 и след.

***) Н. А. У м о в, Собрание сочинений, т. 3, М., 1916, стр. 142.

ческое значение нации может быть прочным при условии, что культурный ее уровень соответствует ее политическому подъему. В наше время оружие, мужество не являются единственными факторами, обеспечивающими успех в борьбе народов за свое развитие и существование». Отметив, что важнейшей характеристикой культурного уровня страны являются ее «вклады в область знания», Умов далее пишет: «Если мы обратимся к нашей стране, мы сознаём, что мы, к сожалению, до сих пор большею частью перенимаем и заимствуем и очень мало вкладываем в культурную жизнь человечества. И если мы посмотрим, что делалось у нас для развития знания, то станет ясным, что старания прилагались к тому, чтобы мы учились, и были довольны, если мы хорошо учились... Музей, кабинет — вот термины, характеризующие прежний взгляд: учись; институт — вот новый взгляд: учись и твори, создай».

В конце девяностых и в начале девятисотых годов положение физики в университетах улучшилось. В Московском, Петербургском и Одесском университетах были построены и оборудованы Физические институты: специальные здания, в которых помещались приспособленные для преподавания экспериментальной физики аудитории, учебные лаборатории для общего и специальных практикумов, научные лаборатории. В Москве трудно оценить историческую роль в конце XIX и в начале XX века сыграла деятельность П. Н. Лебедева, героическими усилиями создавшего первую русскую школу физиков (П. П. Лазарев, В. К. Аркадьев, А. Б. Млодзеевский, Н. А. Капцов, А. К. Тимирязев, Н. К. Щодро, Т. П. Кравец, А. Р. Колли и другие). Сам Лебедев уже в 1900 г. в своих классических работах дал безупречное количественное доказательство существования светового давления на твердые тела в полном соответствии с предсказанием Максвелла, а между тем даже такой выдающийся физик XIX века, как Вильям Томсон — лорд Кельвин, не верил в реальность этого явления. Через несколько лет, в 1908 г., Лебедев доложил Съезду русских естествоиспытателей и врачей свою новую рекордную по трудности работу о световом давлении на газы. Около того же времени А. А. Эйхенвальд, друг детства Лебедева, выдающийся физик и блестящий профессор, закончил свои важные работы о магнитном поле токов смещения и конвекции. Многочисленные выступления Лебедева в различных ученых обществах Москвы с докладами на актуальные современные темы физики и особенно организованный им в Университете еженедельный физический коллоквиум (по современной терминологии — семинар), который посещали не только физики, но и представители смежных специальностей, — все это внесло в научную жизнь Москвы огромное оживление. Но при всем том условия, в которых проходила эта важная деятельность Лебедева, были крайне неблагоприятными. Научные работы не финансировались, техническая база лаборатории отсутствовала. Единственный механик (Алексей Иванович Акулов) помогал Лебедеву в его трудных экспериментах и не мог обслуживать сотрудников (которых тогда называли «практикантами»). Лебедев нашел выход из положения в требовании, чтобы каждый желающий экспериментально работать в его лаборатории прошел предварительно «курс учения» в частной мастерской П. И. Громова (Лебедев шуточно называл ее «университетом Громова») и «сдал зачет» в виде изготовления какого-нибудь небольшого прибора. В процессе работы «практиканты» должны были полностью обслуживать себя, включая все механические и довольно сложные стеклодувные работы в тех случаях, когда в них была необходимость. Само собой разумеется, что никаких «штатных единиц» для научных сотрудников не существовало: те из «практикантов», которые уже окончили университет, отдавали научной работе часы досуга, добывая средства

к существованию преподаванием в средних школах или, в виде исключения, в других высших учебных заведениях.

Однако и этих скромных условий Лебедев был лишен, когда в 1911 г. вместе со всеми прогрессивными профессорами и преподавателями Университета счел своим гражданским долгом уйти из Университета в знак протеста против репрессий в отношении выборного ректората со стороны реакционного министра просвещения *). Уйдя из Университета, Лебедев оказался лишенным всего — кафедры, лаборатории и даже квартиры. На помощь ему пришла общественность. Городской университет им. А. Л. Шанявского организовал для Лебедева лабораторию, которая помещалась в цокольном этаже жилого дома по Мертвому переулку (ныне — Островскому на Кропоткинской), д. № 20, где поселился и Лебедев. Это трагическое для русской науки и культуры событие вызвало широкое общественное движение: выдающиеся ученые — сам П. Н. Лебедев, К. А. Тимирязев, Н. А. Умов и другие — выступили в печати со статьями, доказывавшими необходимость создавать, наряду с университетами, исследовательские институты без учебных функций — «национальные лаборатории», как их назвал Лебедев. Вот что писал по этому поводу Лебедев в статье, опубликованной в газете «Русские ведомости» **): «Если русское общество захочет подать руку помощи своим ученым, если оно сознает свою нравственную обязанность перед лицом всего человечества поставить науку в такие условия, в которых она могла бы свободно жить и развиваться, если оно пожелает на будущее время оградить ее от неожиданных потрясений, — общество может это сделать, принимая участие в создании ряда отдельных специально приспособленных лабораторий, посвященных исключительно научным исследованиям и совершенно независимых от учреждений, преследующих учебные цели... Большие научные физические лаборатории, исключительно предназначенные для научных исследований, уже давно существуют на Западе — в Англии, Германии и Америке. Неуклонно разрабатывая научные вопросы, они, как показал опыт, совершенно негаданным образом обогащают и технику... К сожалению, у нас такой национальной физической лаборатории пока еще не существует, но и потребность в ней и необходимые ученые силы — налицо».

Правительство осталось глухим к этим призывам. Тем не менее возникшее общественное движение не прошло даром. Ученым удалось убедить представителей крупной русской буржуазии в необходимости развития физики в России и на собранные частные пожертвования в порядке общественной инициативы было создано «Московское общество научного института» ***), поставившее своей задачей содействие организации «национальных исследовательских институтов», в первую очередь Физического института для П. Н. Лебедева и Биологического — для Н. К. Кольцова. К сожалению, Лебедеву не удалось увидеть осуществление своей мечты: пережитые потрясения в связи с уходом из Университета привели к обострению болезни сердца, которой он страдал давно, и в марте 1912 г., через год после ухода из Университета, Лебедев скончался в возрасте 46 лет в полном расцвете творческих сил.

*) Министр просвещения Л. А. Кассо, сам бывший профессор Московского университета (юрист), в ответ на протест ректората по поводу нарушения самоуправления Университета дал приказ об увольнении из университета «с причислением по министерству просвещения» ректора, его помощника и проректора — видных ученых, широко известных своей научной и общественной деятельностью.

**) П. Н. Лебедев, Собрание сочинений, М., 1913, стр. 352.

***) Сведения об этом обществе можно найти в брошюре проф. В. М. Хвостова «О значении и задачах научного института», М., 1913.

Его дело продолжал в Москве ученик его и ближайший помощник П. П. Лазарев. В 1915 г., после утверждения Советом Общества научного института проекта здания Физического института, было приступлено к его постройке, и с 1 января 1917 г. в законченном строительстве здания на 3-й Миусской улице открылся Физический институт под руководством П. П. Лазарева, избранного директором Института *). Я специально отмечаю этот факт, так как это был первый в России большой по масштабам того времени исследовательский физический институт, сразу после



Институт физики и биофизики (Москва, 3-я Миусская ул., 3).

революции развернувший широкую деятельность. После ряда переименований, не отражавшихся на программе его деятельности, этот институт получил название «Институт физики и биофизики».

Его директор П. П. Лазарев, избранный академиком в 1917 г., был, несомненно, самым любимым учеником П. Н. Лебедева. Об этом свидетельствуют письма П. Н. Лебедева, часть которых опубликована в книге П. П. Лазарева «Очерки истории русской науки», и тот факт, что его одного Лебедев сделал своим непосредственным помощником и заместителем. Врач и физиолог по образованию, он под влиянием лебедевских коллоквиумов увлекся физикой и быстро полностью переквалифицировался в физика, приобретя в этом процессе весьма серьезную математическую и теоретическую в области классической физики квалификацию. Это позволило ему обратиться на высоком научном уровне к работе в области применения физики к биологии и сделаться одним из основоположников биофизики. Будучи несомненно ученым-романтиком по классификации В. Оствальда (В. О с т в а л ь д, Великие люди), он отличался разносторонностью интересов; в частности, ему принадлежит недостаточно оцениваемая в настоящее время выдающаяся роль в иссле-

*) П. П. Лазарев, Физический институт Московского научного института (в книге акад. П. П. Лазарева «Очерки истории русской науки», под ред. акад. С. И. Вавилова и проф. М. П. Воларовича, М., 1950).

довании Курской магнитной аномалии. Благодаря темпераменту ученого-романтика, он охотно привлекал к работе молодых людей, по традиции Лебедевской лаборатории, начиная со студенческих лет. После ухода вместе с Лебедевым из Университета он объединил вокруг себя, сначала в упомянутой лаборатории Городского университета им. Шанявского, большую группу молодых ученых, большинство из которых перешли



П. П. Лазарев.

во вновь открытый Физический институт. К этой группе принадлежали: П. Н. Беликов, С. И. Вавилов, Б. В. Ильин, Г. С. Ландсберг, Т. К. Молодой, А. С. Предводителей, С. Н. Ржевкин, Н. Т. Федоров, В. В. Шулейкин, Э. В. Шпольский. Позднее к ним присоединились А. С. Ахматов, физиолог И. Л. Кан, В. Л. Левшин, П. А. Ребиндер и другие. Имена этих сотрудников первого советского исследовательского физического института — в то время молодых ученых, впоследствии занявших руководящее положение в научных институтах и на кафедрах высших учебных заведений, — настолько хорошо известны, что они не нуждаются в специальной характеристике. Группа физиков старшего поколения концентрировалась вокруг Московского физического общества (А. А. Эйхенвальд, В. К. Аркадьев, А. И. Бачинский, С. А. Богуславский, Ю. В. Вульф, А. Б. Млодзеевский и др.).

Некоторые из этих ученых заслуживают особой характеристики. Об Эйхенвальде речь была выше. В. К. Аркадьев был одним из наиболее талантливых учеников Лебедева, отличавшимся многочисленными собственными оригинальными идеями. Открытые им «магнитные спектры» железа он, правда, безуспешно пытался интерпретировать классически,

но, как показал впоследствии Я. Г. Дорфман, они были не чем иным, как проявлением ферромагнитного резонанса. Отсутствие теоретической базы для объяснения открытого им явления (1907—1913), реальность которого была подтверждена рядом зарубежных физиков (Р. Ганс и др.), и примитивность экспериментальной техники того времени (по сравнению с применяемой в настоящее время при исследовании магнитного резонанса) не позволили ему найти правильное объяснение своего открытия. В последующие годы он много сделал для развития феноменологической теории ферромагнетизма. А. И. Бачинский был глубоким знатоком феноменологической термодинамики; ему принадлежит известная простая эмпирическая формула, связывающая вязкость жидкости с удельным объемом, точнее — со свободным от молекул объемом; теоретический вывод этой формулы был дан Я. И. Френкелем *). Ю. В. Вульф был кристаллографом. И хотя кристаллография его времени относилась не к физике, а к минералогии, основные работы Вульфа были чисто физическими. Из этих работ особенно важным было исследование поверхностной энергии кристаллов. После открытия дифракции рентгеновских лучей в кристаллах Вульф дал правильное геометрическое объяснение рентгенограмм Лауэ как следствия интерференционного отражения рентгеновских лучей от соответственно расположенных сетчатых плоскостей кристалла. Он был также одним из пионеров рентгеноструктурного анализа в России и СССР. С. А. Богуславский, к сожалению, поздно появившийся в Москве (он долгое время работал за границей, в частности у М. Борна), был высококультурным теоретиком, полностью владевшим всеми передовыми идеями и методами современной ему теоретической физики (квантование Бора — Зоммерфельда, принцип соответствия и т. п.). Ему принадлежит квантовая теория пирозлектричества и важная работа по движению электронов в электромагнитных полях. К сожалению, тяжелая болезнь (активный туберкулез) не позволила ему создать в Москве свою школу и очень рано свела его в могилу.

В наши дни, отмечая выдающиеся успехи советской физики за 50 лет, мы не должны забывать имена этих предшественников, своими трудами и своей деятельностью в качестве ученых и университетских профессоров заложивших прочный фундамент, на котором возвысилось величественное здание советской науки — предмет нашей гордости.

Иначе развивалась физика в Ленинграде. В начале девятисотых годов, в период расцвета деятельности Лебедева и лебедевской школы в Москве, в Петербурге не чувствовалось пульса современной науки. Вот что писал по этому поводу выдающийся советский физик акад. А. Ф. Иоффе **): «Когда я начинал работать в Петербурге (это был 1906 г.), там еще сильны были традиции XIX века, и даже 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 университетах сводилась к феноменологической формулировке законов и решению уравнений в частных производных из области теплопроводности и электростатики. Профессора и преподаватели высших школ обладали обширной эрудицией, но мало внимания

*) См. Я. И. Френкель, Кинетическая теория жидкостей, М., 1945, стр. 192.

**) А. Ф. Иоффе, Советские физики и дореволюционная физика в России, УФН 33, 454 (1947).



Группа московских физиков — учеников П. Н. Лебедева (средний ряд) и П. П. Лазарева (1913 г.). Стоят: П. Н. Беликов, Э. В. Шпольский, Ф. К. Курешин, В. В. Сребницкий, Н. П. Неклепаев, К. А. Леонтьев, С. И. Вавилов, А. Г. Калашников, Н. В. Бакин, А. С. Беркман, Н. К. Щодро, С. Я. Турлыгин, С. Н. Ржевкин, Б. Ф. Розанов. Сидят: В. С. Титов, Г. Б. Порт, В. К. Аркадьев, А. К. Тимирязев, Л. И. Лисицын, П. П. Лазарев, М. А. Чупрова, А. Б. Млодзеевский, Н. Е. Успенский. Сидят впереди: Н. В. Баусов (препаратор), Февралев, Н. Я. Селяков, ?, Т. К. Молодой, П. П. Павлов, П. В. Шмаков, А. И. Акулов (механик П. Н. Лебедева).

уделяли творческой деятельности. Научные работы оставленных при Университете часто сводились к повторению опубликованных работ» *).

Однако именно тогда в Петербурге появилась группа молодых физиков, которой суждено было сыграть важную роль в организации советской физики. Д. С. Рождественский совершенно самостоятельно вел в то время в Петербургском университете свою классическую работу по аномальной дисперсии в парах натрия. А. Ф. Иоффе в качестве магистерской диссертации представил блестящую работу об «элементарном фотоэффекте», где прямым опытом на взвешенных в конденсаторе Милликена металлических пылинках доказал электронную природу фотоэффекта с металлов и статистическую независимость элементарных актов фотоэффекта. Тем самым, наряду с работами Милликена, было дано экспериментальное доказательство существования электронов и световых квантов.

К той же плеяде молодых физиков принадлежал Д. А. Рожанский, «диссертация которого (исследование искры) привлекла всеобщее внимание свежестью физических идей» **).

Наконец, большое влияние оказал выдающийся представитель теоретической физики П. С. Эренфест, в то время работавший в Петербурге ***). Эренфест тогда уже приобрел большой авторитет, в частности, после опубликования в «Энциклопедии математических наук» вместе со своей женой Т. А. Афанасьевой-Эренфест монографии по основам статистической механики. Обладая острым критическим чутьем, широкими и разносторонними интересами в самых актуальных проблемах теоретической физики того времени, он привлекал к себе молодежь своим необычайно живым темпераментом. В 1912 г. он занял кафедру теоретической физики в Лейдене, освободившуюся после ухода на покой Г. А. Лоренца. Но, несмотря на это, он сохранял тесную связь с советскими физиками, и притом не только со своим старым другом А. Ф. Иоффе, но и с молодыми физиками, студентами, начинающими теоретиками. Во время пребывания в Петербурге он организовал в Университете семинар по новой физической литературе, где горячо обсуждались работы по самым «жгучим» проблемам физики — относительности и квантам. Его влиянием в значительной степени объясняется быстрый рост теоретической физики в Петрограде накануне первой мировой войны (1910—1914) и в первые годы революции. Появились талантливые и широко эрудированные молодые теоретики — Ю. А. Круглов, В. Р. Бурсиан, Г. Г. Вейхард (рано скончался от тифа). Позднее к ним присоединились А. А. Фридман, В. К. Фредерикс, Я. И. Френкель, В. А. Фок. Это были люди, которым в начале двадцатых годов исполнилось 25—30 лет. Вокруг них сконцентрировалась жадная до знаний талантливая молодежь в возрасте около 20 лет и возникла своего рода «цепная реакция», которая привела к появлению таких ярких представителей следующего поколения, как Л. Д. Ландау — один из признанных вождей современной теоретической физики.

В Петрограде в самом начале революции наметились две группы физиков. Одна — связанная с семинаром А. Ф. Иоффе и включавшая в то время молодых ученых, имена которых теперь известны всему миру. Это — П. Л. Капица, Н. Н. Семенов, Я. И. Френкель, П. И. Лукирский. Вторая группа состояла из энтузиастов научной и прикладной оптики во главе с Д. С. Рождественским и его соратниками в борьбе за создание

*) А. Ф. Иоффе, цит. статья, стр. 465.

**) А. Ф. Иоффе, там же.

***). См. статьи Г. Юленбека и А. Ф. Иоффе, УФН 62, 367 (1957).

оптико-механической промышленности в России (А. И. Тудоровский, А. Л. Гершун старший и др.); из молодежи к ней в то время принадлежали И. В. Обреимов, И. В. Гребенщиков и студенты А. Н. Теренин, С. Э. Фриш, В. К. Прокофьев и др. Эти группы вместе с Московской группой П. П. Лазарева, о которой речь была выше, и образовали те центры, вокруг которых возникли и выросли крупные советские исследовательские физические институты, созданные в первые годы революции.

С первых дней революции Советским правительством в большом масштабе была предпринята организация научно-исследовательской работы. Интенсивное развитие научно-исследовательских институтов логически вытекало из неуклонно проводившегося Советским правительством принципа, в силу которого научно-исследовательская работа была положена в основу индустриального развития страны, развития ее сельского хозяйства, здравоохранения, развития ее культуры. Наука была признана необходимым элементом государственного строительства. Мечта выдающихся русских ученых конца XIX и начала XX столетия осуществлялась Коммунистической партией, Советским правительством.

Что касается физики, то начало планомерного создания научных институтов относится еще к 1918 г. В то суровое время, в разгар борьбы с контрреволюцией и интервенцией, с многочисленными хозяйственными затруднениями, доставшимися революции в наследство от первой мировой войны, были созданы крупнейшие институты, быстро переведшие науку в СССР на новый, более высокий уровень. Пионерами в этом исторически важном деле были выдающиеся советские ученые П. П. Лазарев, А. Ф. Иоффе и Д. С. Рождественский. Первый из них, П. П. Лазарев, как было сказано, создал в Москве Институт физики и биофизики на базе только что организованного перед революцией Физического института Московского научного института, который включил в программу своих работ широкий круг проблем физики, биофизики, геофизики. А. Ф. Иоффе и Д. С. Рождественский создали в Ленинграде Физико-технический и Оптический институты. Первыми сотрудниками перечисленных институтов были молодые ученые, тогда группировавшиеся вокруг своих руководителей. Впоследствии многие из них сами создали свои научные школы, насчитывающие к настоящему времени уже два поколения ученых.

В декабре 1918 г. в Петрограде собрался Первый съезд русских физиков *), который сыграл роль учредительного съезда советской физики, так как на нем была основана «Российская ассоциация физиков». Петроград в ту пору переживал суровые дни: он был пустой, холодный и голодный. Но энтузиазм сравнительно небольшой группы ученых различных возрастов, горячо обсуждавших предстоящие для разрешения научные проблемы, был так велик, что он заставлял участников совершенно позабыть эти внешние затруднения.

Настроение собравшихся можно охарактеризовать прекрасными словами Д. С. Рождественского, сказанными им год спустя, 15 декабря 1919 г. в заключении его речи «Спектральный анализ и строение атомов» на первом годичном собрании уже созданного Оптического института *): «Мы живем в вихре социального переворота. Быстро перековывается уклад человеческой жизни на будущее искомое, желанное счастье — с неизбежной

*) Не следует смешивать этот съезд, на котором вследствие обстоятельств времени могли присутствовать только ленинградские и московские физики, с Первым съездом Российской (что по тому времени было равносильно Всесоюзной) ассоциации физиков, который состоялся в Москве в 1920 г.

**) Д. С. Рождественский, Спектральный анализ и строение атомов Труды Государственного оптического института, т. 1, вып. 6, Петроград, 1920 стр. 87.



Первый съезд советских физиков (Петроград, 1918 г.). В первом ряду сидят:?, П. М. Никифоров (геофизик), Ю. В. Вульф, П. П. Лазарев, А. Н. Крылов, О. Д. Хвольсон, С. Я. Терешин,?, ?. В 3-м ряду с левой стороны: А. С. Предводителей, А. И. Бачинский, П. В. Шмаков, К. Н. Шапошников,

жестокостью, с неизбежным разрушением старого... И если — так показывает опыт — бурное стремление социального переворота неизбежно, то в этом перевороте наука, источник близкого будущего и материального блага, должна быть сохранена».

«Мы же, вопреки словам поэта, в „грозе изменений“ не „унесем зажженные светы в катакомбы, пустыни, пещеры“, а засветим их ярче и поставим на горе, чтобы они светили каждому».

В конце двадцатых и в тридцатые годы организация новых физических исследовательских институтов приобрела особенно широкий размах. Наибольшую активность в этом важном деле, как и вообще в организации советской физики, проявил А. Ф. Иоффе. Блестящий физик, одаренный необычайно тонкой физической интуицией, он был вместе



А. Ф. Иоффе.

с тем выдающимся общественным деятелем в области организации науки, горячо преданным делу создания передовой советской физики. По его инициативе были созданы институты в ряде важных промышленных центров и на периферии страны. Желая оказать наибольшее содействие этим вновь организованным институтам, он пошел на такую эффективную меру, как выделение из руководимого им Физико-технического института ряда ответственных и талантливых сотрудников, что на время создало опасность для нормального развития его собственного института. Наконец, следует отметить проявленную А. Ф. Иоффе инициативу в подготовке кадров физиков — создание при Ленинградском политехническом институте факультета совершенно нового типа — Физико-технического факультета.

Были созданы также новые крупные институты в центре страны — в Москве и Ленинграде. Таков Физический институт Академии наук СССР им. П. Н. Лебедева, первоначально основанный на базе той самой физической лаборатории Академии наук, о которой речь была выше, но, начиная с 1934 г., с переездом Академии в Москву, благодаря энергии и инициативе его директора С. И. Вавилова, превратившийся в мощный научный центр *). Отметим, далее, созданный П. Л. Капицей Институт физических проблем Академии наук СССР, прославившийся



Д. С. Рождественский.

своими замечательными работами в области физики низких температур, теоретической физики и в других областях. Украина имеет ряд крупных институтов, в том числе Физико-технический институт в Харькове и Физический институт АН УССР в Киеве. В Томске создается Сибирский физико-технический институт, в Свердловске — Институт физики металлов. В Белоруссии, Грузии, Армении, Казахстане и других республиках создаются научные центры в области физики. В последнее время ряд институтов создан при Сибирском отделении Академии наук СССР. В задачу этой статьи не входит обзор деятельности всех институтов и научно-исследовательских лабораторий, организованных после революции и развивающих интенсивную деятельность на высоком современ-

*) Историю этого института см. в статье С. И. Вавилова «Физический кабинет — физическая лаборатория — физический институт Академии наук СССР за 220 лет», УФН 28 (1), 1 (1946); см. также статью Д. В. Скобельцына и И. М. Франка, УФН 63 (3), 503 и след. (1957).

ном научно-техническом уровне. Большую роль в развитии и укреплении физических институтов Академии наук СССР, ее филиалов, экспедиций и баз сыграла деятельность президента Академии наук СССР С. И. Вавилова (1945—1951).

Особо следует отметить тот рост, который получила в Советском Союзе в послевоенные годы ядерная физика и физика элементарных частиц в связи с исключительным значением работ в этих областях. Как известно, работы в области ядерной физики предъявляют особенно



С. И. Вавилов.

высокие требования как к творческой активности ученых, так и к научно-техническому уровню институтов и лабораторий, в свою очередь предъявляющему небывало высокие требования к общему уровню техники в стране. В Советском Союзе организация работ в этой области была поставлена в широком масштабе. Был создан ряд лабораторий, оборудованных по последнему слову техники. Среди них — мощные институты: Институт атомной энергии в Москве и Объединенный институт ядерных исследований в Дубне.

В последующие годы, ввиду резкого возрастания роли полупроводников в физике и технике, организован специальный Институт полупроводников АН СССР, созданный А. Ф. Иоффе и носящий в настоящее время его имя.

Наряду с созданием институтов, специально занимающихся научно-исследовательской работой, были значительно расширены и старые университетские центры. Наиболее крупным из них является Физический институт Московского университета, сыгравший важнейшую роль в раз-

витии физики в СССР, главным образом благодаря работам Л. И. Мандельштама и его школы в области физической оптики и теории колебаний. В 1953 г. этот институт получил уникальные по богатству научные лаборатории в новом здании на Ленинских горах. Большая работа выполнена также в стенах Физического института Ленинградского университета, в Одесском, Киевском и Томском университетах и в ряде других.

II. ОБЗОР РАБОТ СОВЕТСКИХ ФИЗИКОВ

В дальнейшем мы попытаемся дать обзор важнейших работ, выполненных советскими физиками за истекшие 50 лет. В этот полувек период сама физика претерпела поистине грандиозные изменения. В этом победоносном движении, утверждающем совершенно непредвиденную по грандиозности масштаба власть человека над природой и глубочайшее проникновение в ее законы, советские физики идут в первой шеренге во всех областях своей беспримерно широкой науки. В статье ограниченного размера, как данная, не может быть и речи ни о полноте освещения всех выполненных советскими физиками работ, ни о полноте списка ученых, трудам которых наша наука обязана своим процветанием. Волей-неволей пришлось ограничить себя и в выборе освещаемых проблем, в частности отказавшись от рассмотрения пограничных областей, таких, как астрофизика, которая благодаря последним работам стала гораздо ближе к физике, нежели была раньше. Не затронуты и вступившая в совершенно новую многообещающую фазу развития биофизика, новая, родившаяся в тот же пятидесятилетний период химическая физика, геофизика. Все это — хотя и связанные с физикой — самостоятельные большие науки, однако каждая из них потребовала бы особой большой статьи. Возможная неравномерность в освещении различных отделов физики почти неизбежна для статьи, написанной одним автором. Повторения, допущенные в небольшом числе мест, введены сознательно, чтобы избавить читателей, имеющих ограниченный круг интересов, от необходимости читать всю статью.

При всех этих оговорках я бы не смог выполнить стоявшую передо мной труднейшую задачу — дать компетентную, современную и притом достаточно широкую картину замечательных достижений советской физики, если бы не дружеская помощь ряда членов редакционной коллегии журнала, а также и других коллег, к которым я обращался за советами.

Общие вопросы теоретической физики

Теоретическая физика как самостоятельная «профессия» возникла вследствие необычайного развития физики в XX столетии *). В XIX веке большинство крупных физиков были теоретиками и экспериментаторами. Примерами среди ученых XIX столетия и начала XX могут служить лорд Рэлей или Дж. Дж. Томсон. Глубокие теоретические работы Л. Больцмана общеизвестны, но, может быть, не все знают, что ему же принадлежат тонкие экспериментальные работы по диэлектрическим постоянным газов. В России одновременно теоретиками и экспериментаторами были

*) Впрочем, М. Планк, деятельность которого как ученого началась в семидесятих годах XIX столетия, был уже чистым теоретиком. Он считает «отцом» теоретической физики в Германии Ф. Неймана (1798—1895) (см. M. P l a n k, Vorträge und Erinnerungen, Stuttgart, 1949).

многие физики — А. Г. Столетов, Н. А. Умов, Н. Н. Шиллер, — деятельность которых либо целиком, либо главным образом относилась к XIX столетию. Постепенно, однако, как математические, так и экспериментальные методы настолько усложнились, что физики должны были решать своеобразную проблему «выбора профессии» — стать ли теоретиком или экспериментатором.

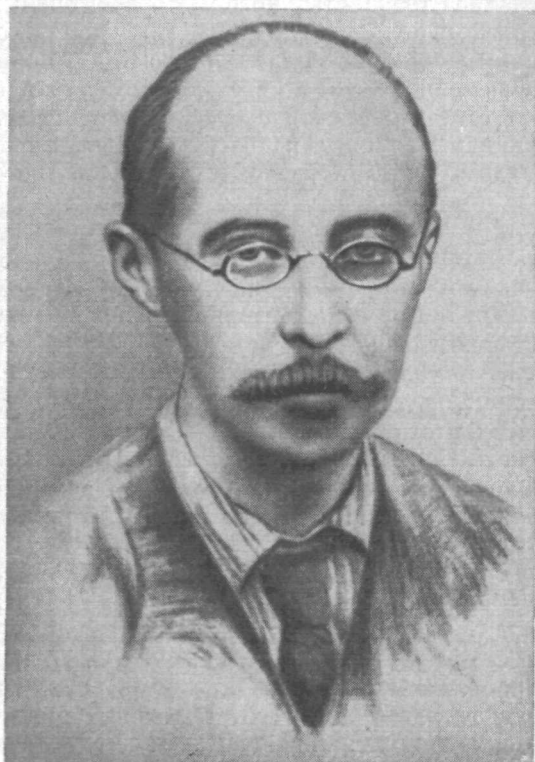
Поскольку объектом работы физика-теоретика может быть любая физическая проблема, понятие «теоретическая физика», строго говоря, охватывает всю физику. В нашем обзоре мы выделяем в особую рубрику «теоретическая физика» те работы, которые относятся к наиболее общим проблемам и теориям современной физики: теории относительности, квантовой механике и статистике. Наряду с этим ссылки на работы теоретиков будут даны практически во всех дальнейших рубриках. Едва ли нужно говорить о том, что в обзоре, подобном нашему, охватывающем всю физику, глубокие и трудные работы по теоретической физике могут быть охарактеризованы лишь бегло и поверхностно — почти только по названиям.

До революции в России теоретическая физика в том смысле, как этот термин мы здесь применяем, была представлена слабо. И это несмотря на то, что к моменту начала революции уже существовали теория относительности специальная и общая, теория квантов Планка, атом Бора с его проблемами квантования различных систем и, наконец, классическая статистика. В новых условиях научной работы, созданных Советским правительством, в только что организованных научно-исследовательских институтах и старых университетах уже появились в то время молодые теоретики И. Е. Тамм, Я. И. Френкель, Ю. А. Крутков, В. А. Фок, А. А. Фридман и некоторые другие, которые и образовали ядро для последующего интенсивного количественного и качественного развития теоретической физики в СССР.

В настоящее время у нас имеются крупные школы физиков-теоретиков. Отметим большие группы учеников И. Е. Тамма (С. А. Альтшулер, С. З. Беленький, Д. И. Блохинцев, С. В. Вонсовский, А. Д. Галанин, В. Л. Гинзбург, А. С. Давыдов, М. А. Марков, С. И. Пекар, А. Д. Сахаров, Е. Л. Фейнберг, С. П. Шубин, В. С. Фурсов и др.) и Л. Д. Ландау (А. А. Абрикосов, А. И. Ахиезер, В. Б. Берестецкий, Л. П. Горьков, И. Е. Дзялошинский, В. Г. Левич, Е. М. Лифшиц, И. М. Лифшиц, А. Б. Мигдал, Л. П. Питаевский, И. Я. Померанчук, И. М. Халатников, Я. А. Смородинский и др.). Большинство этих теоретиков, в сущности принадлежащих к третьему поколению советских физиков, имеют своих уже сложившихся учеников (упомянем М. Я. Азбеля, В. В. Железнякова, Э. А. Канера, Л. В. Келдыша, Д. А. Киржница, М. И. Каганова, Л. Б. Окуня, В. П. Силина, С. И. Сыроватского, В. Я. Файнберга, Е. С. Фрадкина и др.). В сороковых годах возникла школа Н. Н. Боголюбова (А. А. Логунов, С. В. Тябликов, М. К. Поливанов, В. Л. Бонч-Бруевич и др.).

Из работ по наиболее общим проблемам теоретической физики следует прежде всего упомянуть широко известную работу А. А. Фридмана по общей теории относительности. В этой работе А. А. Фридман впервые показал, что уравнение тяготения общей теории относительности Эйнштейна допускает нестационарные решения. Между тем Эйнштейн в 1917 г. ввел в свое уравнение тяготения так называемый космологический член с «космологической постоянной» λ именно для того, чтобы обеспечить стационарность Вселенной, т. е. постоянство ее радиуса R . Результат работы Фридмана состоит в том, что, вопреки этому, казалось бы, очевидному требованию, теория тяготения Эйнштейна приводит к возможности

изменения «радиуса Вселенной» с течением времени, в частности — к расширяющейся Вселенной. Вывод этот первоначально оспаривался Эйнштейном, но затем был признан им правильным, а возражение — основанным на ошибке в вычислениях. Через 7 лет после опубликования работ Фридмана американский астроном Хаббл сделал поразительное открытие, что удаленные галактики разбегаются от нас с огромной скоростью, возрастающей пропорционально расстоянию до галактик. Этот вывод был сделан на основании сильного красного смещения линий в спект-



А. А. Фридман.

рах галактик, которое естественно было истолковано как доплеровское смещение; попытка истолкования этого смещения как следствия «старения фотонов» на длинном пути от галактики до Земли не выдерживает критики *). В дальнейшем существенный вклад в развитие ОТО и ее применений в космологии внесли работы Я. Б. Зельдовича, Е. М. Лифшица, И. Д. Новикова, А. З. Петрова, И. М. Халатникова и некоторых других. Весьма важной работой по теории тяготения была работа В. А. Фока, посвященная приближенному решению проблемы n тел в теории тяготения Эйнштейна.

Современная квантовая механика была создана в середине двадцатых годов в появившихся в быстрой последовательности работах Л. де Бройля, Э. Шрёдингера, В. Гейзенберга, Н. Бора, П. А. М. Дирака. С момента формулирования основных идей уравнений квантовой

*) См. статью Я. Б. Зельдовича «Теория расширяющейся Вселенной, созданная А. А. Фридманом», УФН 80, 357 (1963).

механики советские физики-теоретики приняли самое активное участие в разработке приближенных методов решения уравнения Шрёдингера и в применениях методов квантовой механики к решению разнообразнейших частных проблем. В этом разделе мы, как сказано, останавливаемся только на итогах работ, имеющих наиболее общий характер.

К числу таких работ относятся работы В. А. Фока, посвященные развитию приближенного метода решения уравнения Шрёдингера для многих тел. Как известно, уравнение Шрёдингера в принципе позволяет решить любую задачу квантовой физики. Однако для системы многих



Я. И. Френкель.

тел задача быстро становится настолько сложной, что точное решение ее практически невозможно. Но в абсолютно точном решении таких задач и нет надобности, поскольку результаты измерений всегда имеют ограниченную точность. Поэтому важнейшее значение имеют хорошие приближенные методы. В квантовой механике таким надежным методом является так называемый метод Хартри — Фока, предложенный Хартри и затем радикально улучшенный В. А. Фоком. В основе этого метода лежит модель так называемого «самосогласованного поля», в котором, например, при решении задачи о многоэлектронном атоме движение каждого электрона рассматривается как движение в поле ядра и усредненном поле, создаваемом остальными электронами. Коренное улучшение, внесенное В. А. Фоком, приводит к уравнениям для волновых функций отдельных электронов, содержащим, кроме членов, входящих в прежние уравнения, еще и члены, соответствующие взаимодействию

между электронами, а именно — обменному взаимодействию. Решение этих уравнений позволяет для случая атома вычислить уровни энергии и интенсивности спектральных линий. С помощью этого метода В. А. Фоком и М. А. Петрашень была, например, решена задача об атоме натрия, причем было найдено значение основного терма и ионизационного потенциала натрия с точностью до 2%. Не следует забывать, что все эти расчеты велись в тридцатые годы, когда современные счетные машины отсутствовали.

К числу основополагающих работ, в которых решались общие проблемы квантовой физики, принадлежит работа Л. И. Мандельштама и М. А. Леонтовича о поведении квантовой частицы при наличии в пространстве потенциального барьера. Эта работа содержала основы теории «туннельных переходов» — совершенно своеобразного явления, как известно, играющего важнейшую роль в бесчисленных процессах атомного или ядерного масштаба, т. е. процессах, принадлежащих к числу основных явлений в атомной физике и электронике.

В последующие годы усилия теоретиков были направлены на разработку релятивистской квантовой механики и квантовой электродинамики, или, точнее, квантовой теории поля вообще (имея в виду не только электромагнитные, но и мезонные поля). В этих сложнейших проблемах, связанных с применением самых рафинированных математических методов, советские физики-теоретики чувствуют себя «как дома» и вносят существенные вклады. Без какой-либо претензии на то, чтобы дать хотя бы отдаленное представление о полученных здесь результатах, упомянем о теории ядерных сил И. Е. Тамма и о развитом им приближенном методе решения уравнений квантовой мезодинамики, отличном от обычно применяемой теории возмущений (так называемый метод Тамма — Данкова; ранее аналогичный метод был применен В. А. Фоком для решения некоторых задач квантовой электродинамики).

В области общих проблем термодинамики и статистики большое значение имели работы Л. Д. Ландау по термодинамической теории фазовых превращений 2-го рода, к числу которых относятся некоторые превращения в сплавах, превращения ферромагнетиков в парамагнетики и вообще превращения, связанные с «точками Кюри». Важные работы по основам статистической механики были опубликованы Н. Н. Боголюбовым и М. А. Леонтовичем. Н. Н. Боголюбову принадлежат широко известные работы по теории кинетических уравнений и теории волновых полей (строгое доказательство дисперсионных соотношений и др.).

Одним из наиболее сенсационных открытий последнего десятилетия явилось установление того поразительного факта, что в свойствах пространства существуют понятия правого и левого. Обнаруженные экспериментально кажущиеся противоречия в поведении K -мезонов были объяснены Ли и Янгом (США) нарушением при распаде K -мезонов одного из важнейших законов сохранения квантовой механики, а именно закона сохранения «четности». Суть принципа сохранения четности, наглядно говоря, выражается в требовании инвариантности законов природы относительно зеркального отражения. Выдвинутое вначале в качестве гипотезы для объяснения специального случая — распада K -мезонов — нарушение принципа сохранения четности в так называемых «слабых взаимодействиях» было вскоре совершенно убедительно показано экспериментами Ву и группы сотрудников Национального Бюро стандартов США с β -распадом ориентированных ядер Co^{60} .

В связи с этой проблемой Л. Д. Ландау выдвинул чрезвычайно интересный принцип, в силу которого право-левая симметрия связывается

с электрическим зарядом. Это значит, что если частице с положительным зарядом присуща пространственная асимметрия определенного типа, скажем правый винт, то частице, имеющей отрицательный заряд, должна быть свойственна противоположная асимметрия, т. е. левый винт. Поскольку зеркальным отражением правого винта является левый винт, нарушение симметрии при зеркальном отражении компенсируется изменением знака заряда на противоположный. Таким образом, существующие в природе асимметрии — асимметрия электрического заряда и пространственная право-левая асимметрия — комбинируются в некий новый высший тип симметрии, проявляющийся в принципе, названном Ландау «принципом комбинированной четности», или в принципе так называемой *CP*-инвариантности (*C* — первая буква слова *charge* — заряд, *P* — первая буква слова *parity* — четность). В этой увлекательной области, где проявляются весьма глубокие основные законы природы, мы стоим, возможно, накануне новых важных открытий. Следует заметить в связи с этим, что в самое последнее время появились сомнения также и в *CP*-инвариантности.

В связи с несохранением четности находится так называемая двух-компонентная теория нейтрино, предложенная Л. Д. Ландау. Согласно этой теории каждому импульсу соответствуют два спиновых состояния, а не четыре, как необходимо было предположить для удовлетворения принципа сохранения четности. Эти состояния таковы, что спин нейтрино параллелен импульсу, а спин антинейтрино антипараллелен. Наглядно можно себе представить, что спин и скорость нейтрино соответствуют вращению и поступательному перемещению правого винта, а спин антинейтрино — вращению и поступательному перемещению левого винта. Эта теория имеет ряд важных следствий и вносит значительное упрощение в ранее существовавшие представления в теории элементарных частиц.

Физика элементарных частиц

Эта фундаментальная новая область исследований привлекает к себе в последнее время особенное внимание. Ее развитие непрерывно связано с возможностью «зондирования» материи частицами высоких и сверхвысоких энергий, под каковыми имеются в виду частицы с энергиями, измеряемыми миллиардами ($1 \text{ Гэв} = 10^9 \text{ эв}$), десятками и сотнями миллиардов электрон-вольт, а в последнее время в США и в СССР поставлен даже вопрос о контролируемом получении частиц с энергиями в 1000 Гэв , т. е. 10^{12} эв . Ввиду связи исследования элементарных частиц с частицами высоких энергий и самую эту область часто называют физикой высоких энергий.

Причина напряженного интереса к физике высоких энергий и оправдание огромных материальных затрат, на которые идут для обеспечения возможности исследований в этой области главные страны, в том числе, конечно, и СССР, состоят в открывшейся здесь возможности необычайно глубокого проникновения в природу окружающего нас мира, познания фундаментальных законов природы, а быть может, даже и структуры пространства и времени. Не входя в детали, можно обосновать эти увлекательные перспективы простой ссылкой на квантовый закон — непосредственное следствие волновых свойств всех видов материи, в силу которого чем меньше размеры области пространства и интервалы времени, подлежащие исследованию, тем короче должна быть применяемая с этой целью длина волны, а следовательно, тем больше энергия. Этот закон имеет универсальную применимость; в рамки его укладываются все проблемы разрешающей способности, начиная от разрешающей способности

оптических и электронных микроскопов и кончая ускорителями на многие $\Gamma\text{эв}$; последние тоже являются своего рода микроскопами, позволяющими проникнуть в тончайшие детали структуры микрокосмоса. Однако самым важным свойством частиц высоких энергий является то, что они, помимо проникновения в структуру «элементарных» частиц, сами являются и генераторами новых частиц с совершенно своеобразными свойствами.

На первых ступенях развития области высоких энергий физики не имели возможности ставить здесь детально контролируемые эксперименты. Они имели дело только с одним источником частиц высоких энергий: с космическими лучами. Космические лучи, как известно, представляют поток заряженных частиц, главным образом протонов, приходящих на Землю из мирового пространства. Хотя число частиц космических лучей, падающих на 1 см^2 в секунду, относительно очень мало, благодаря их большой энергии, при помощи космических лучей удалось наблюдать многие важные явления, относящиеся к физике элементарных частиц. Достаточно напомнить, что именно в космических лучах были открыты важнейшие новые элементарные частицы — позитроны, μ -мезоны и π -мезоны. В настоящее время в связи с развитием техники ускорителей, открывшим возможность постановки в этой области эксперимента в контролируемых условиях, многие явления, которые ранее могли наблюдаться только в космических лучах, стали доступными для лабораторного эксперимента. Несмотря на это, изучение космических лучей сохранило свое значение для исследования явлений при сверхвысоких энергиях. В связи с обширностью полученных в этой области результатов изучение космических лучей превратилось в самостоятельную весьма обширную область науки. Необходимо, однако, отметить те важные открытия, которые были сделаны советскими физиками на первых стадиях изучения этого интереснейшего явления, долгое время служившего единственным путем для изучения своеобразных законов природы, имеющих место при высоких энергиях.

Упомянем прежде всего, что на самых ранних этапах исследований в этой области, в двадцатые годы, после широко известных работ Милликена, изучавших космические лучи путем погружения заряженных электроскопов в глубокие горные озера, многочисленные наблюдения аналогичного характера были выполнены Л. В. Мысовским. Наиболее важные работы, впервые приподнявшие завесу, закрывавшую природу этого казавшегося загадочным излучения, были произведены в конце двадцатых годов Д. В. Скобельцыным. В 1927 г. Скобельцын, изучая при помощи камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле, электроны отдачи, возникающие при эффекте Комптона от γ -лучей, обнаружил на своих фотографиях некоторое число частиц, не отклоняемых имевшимся в его распоряжении магнитным полем. Предполагая, что эти частицами являются электроны, Скобельцын оценил их энергию по кривизне следа не менее 15 Мэв ; он приписал их результатам взаимодействия космических лучей с веществом.

В следующей работе, относящейся к 1929 г., Скобельцын обнаружил, что нередко на одной фотографии наблюдаются следы двух или трех таких частиц высоких энергий. Статистическая обработка частоты такого одновременного появления нескольких частиц показала, что с большой степенью вероятности можно утверждать, что это совпадение не случайно и что эти частицы связаны между собой. Тем самым было открыто замечательное явление, называемое ливнями частиц. В последующем, используя камеру Вильсона в магнитном поле, управляемую счетчиками на совпадениях (установка, позволявшая срабатывать камере Вильсона именно

тогда, когда через нее проходят частицы больших энергий), Блэкке, и Оккиалини сфотографировали большое число ливней из многих частиц а вслед за тем Андерсон открыл в ливнях позитроны. Все эти факты оправдывают характеристику упомянутых работ Скобельцына как заложивших основу для понимания природы космических лучей — явления, существенно отличающегося от обычных, и по существу как начало исследований в области физики высоких энергий.

По указанной выше причине, я не имею возможности проследить дальше историю исследований космических лучей и участие в ней советских физиков, которое осуществлялось в ряде экспедиций. Большой материал по этим вопросам читатели найдут в книге Н. А. Добротина *).

Особенно интенсивное развитие физики элементарных частиц началось после усовершенствования техники ускорителей, позволившего получать потоки заряженных частиц с энергиями, измеряемыми миллиардами электрон-вольт, и с интенсивностью, во много раз превосходящей очень слабую интенсивность космического излучения. Благодаря этому оказалось возможным воспроизводить в лабораторных условиях явления, наблюдаемые в космических лучах в качестве редчайших событий, и накопить тем самым огромную информацию. Правда, в космических лучах встречается небольшая доля частиц с энергиями до 10^{20} эв, т. е. по крайней мере на 6 порядков превосходящими энергию, осуществляемую в современных наиболее мощных ускорителях. Но поскольку продвижение вперед в любой области физики зависит не только от совершенства экспериментальной техники, но и от состояния теории, позволяющей осмыслить результаты наблюдений, то, что удалось получить на существующих ускорителях и может быть получено на строящихся и проектируемых, создает еще непочатый край для работы экспериментаторов и теоретиков.

Решающий успех в построении современных мощных циклических ускорителей был достигнут благодаря работе В. И. Векслера, выдвинувшего и обосновавшего так называемый принцип автофазировки (1944) **). Суть дела, коротко говоря, состоит в следующем. Как известно, предел достижимых с помощью циклотрона энергий ускоряемых частиц, обусловлен релятивистской зависимостью массы от скорости; когда скорость частицы становится сравнимой со скоростью света, период обращения частицы T становится отличным от периода ускоряющего электрического поля T_0 , вследствие чего резонанс между полем и циклическим обращением частицы нарушается и частица, попадая в щель между дуантами, начинает тормозиться. Однако Векслер обратил внимание на то, что это торможение и связанное с ним изменение энергии будут происходить до тех пор, пока T вновь не сравняется с T_0 . Если поэтому адиабатически изменять T_0 , то T будет совершать колебания около T_0 , изменяться вместе с ним, а энергия — совершать колебания около растущего значения, соответствующего T_0 ; благодаря этому в принципе можно безгранично повышать энергию частиц в ускорителе без большого повышения разности потенциалов между дуантами. В этом и заключается замечательный по остроумию принцип автофазировки, который сразу создал новую эпоху в построении, а следовательно, и в применениях ускорителей. Построенные на этом принципе фазотроны, синхрофазотроны

*) Н. А. Добротин, Космические лучи, М., Гостехиздат, 1954.

**) Несколько позднее Векслера и независимо от него тот же принцип был использован Мак-Миланом в США в проекте усовершенствования циклических ускорителей.

позволили перейти от энергий частиц, измеряемых десятками *Мэв*, к энергиям в десятки *Гэв*. Вообще, вопрос о достижимых энергиях стал определяться только техническими возможностями и экономическими соображениями (для примера роли последних можно привести следующие цифры: построение ускорителя, беватрона, лаборатории им. Лоуренса



В. И. Векслер.

в Беркли, Калифорния, на 6,2 *Гэв* стоило 30 миллионов долларов, его эксплуатация обходится в 22 миллиона долларов ежегодно *).

Большими достижениями явились запуски мощных ускорителей протонов — синхрофазотрона Объединенного института ядерных исследований (Дубна) на энергию 10 *Гэв* и первого в нашей стране синхрофазотрона с жесткой фокусировкой на энергию 7 *Гэв* Института теоретической и экспериментальной физики в Москве. Эти установки были созданы в результате совместной работы большого коллектива советских физиков под руководством В. И. Векслера, А. И. Алиханова, В. В. Владимирского, Д. В. Ефремова, Е. Т. Комара, коллектива работников радиотехнической лаборатории Академии наук СССР под руководством А. Л. Минца и при участии ряда других научно-технических учреждений, среди которых необходимо назвать Физический институт АН СССР им. П. Н. Лебедева (А. А. Коломенский, В. А. Петухов, М. С. Рабинович).

В Советском Союзе в настоящее время, кроме этих мощных ускорителей и ряда ускорителей протонов на энергию, меньшую 1 *Гэв*, рабо-

*) По данным отчета о состоянии физики в США: Physics: Survey and Outlook, Nat. Acad. Sci.— Nat. Res. Council, Washington, 1966, стр. 53, табл. 2.

тают ускорители электронов на 2 Гэв (А. И. Алиханян, Ереван) и 6 Гэв (К. Д. Синельников, Харьков). Наконец, в Институте физики высоких энергий в Серпухове строится крупнейший в мире ускоритель на энергию протонов 70 Гэв.

Хотя автофазировка в циклических ускорителях позволяет в принципе повышать энергию частиц беспределно, на пути дальнейшего развития этой техники стоят два главных затруднения. Первое состоит в размерах и стоимости этих сооружений. Второе — в том, что в силу законов релятивистской динамики энергия частиц, разгоняемых в этих ускорителях, может быть использована по своему прямому назначению лишь в незначительной части: когда энергия палетающей частицы превышает энергию покоя исследуемой, большая часть энергии тратится на движение общего центра инерции обеих частиц и только незначительная часть остается в системе центра инерции. Но именно за счет этой последней энергии и возникают те явления, ради изучения которых строится ускоритель. Чтобы избежать столь неэффективного использования дорогостоящей энергии, предлагается направить навстречу друг другу частицы с равными импульсами. В этом случае обе системы координат — лабораторная и система центра инерции — являются совмещенными, и даже в нерелятивистском случае энергия соударения двух одинаковых частиц оказывается в 4 раза большей, а в релятивистском — выигрыш энергии еще возрастает. В этом и состоит основной принцип совершенно нового направления в развитии ускорителей заряженных частиц — ускорителей со встречными пучками. В практическом осуществлении этого принципа имеется следующая трудность: в установке со встречными пучками мишенью служит второй пучок, плотность которого на много порядков меньше плотности конденсированной среды, служащей мишенью при экспериментах с обычными ускорителями. Однако эту трудность можно значительно уменьшить, заставив пучки проходить друг сквозь друга много раз в так называемых накопительных кольцах.

Работы по созданию электронных ускорителей со встречными пучками частиц ведутся в Новосибирском институте ядерной физики под руководством Г. И. Будкера. В этом институте были запущены ускорители со встречными как электронными, так и электрон-позитронными пучками. Ведутся работы по созданию ускорителей со встречными протон-протонными пучками *).

После изобретения бетатрона советскими физиками было показано, что «потолок» для ускорения электронов этим прибором обусловлен тем, что подвергающиеся ускорению электроны в конечном счете, в силу законов классической электродинамики, должны начать терять энергию вследствие излучения электромагнитных волн (Д. Д. Иваненко, И. Я. Померанчук и А. А. Соколов, позднее — Л. А. Арцимович и И. Я. Померанчук). Такое радио- и видимое излучение (когерентное и некогерентное), по понятной причине названное «синхротронным», было на самом деле открыто и изучено в США Поллоком и А. М. Прохоровым в ФИАН. Заметим попутно, что этот факт возникновения излучения при движении электронов в магнитном поле по криволинейным траекториям недавно получил неожиданное применение в астрофизике. Именно, согласно гипотезе, сформулированной В. Л. Гинзбургом и И. С. Шкловским и подтвержденной последующими поляризационными измерениями, свечение со сплошным спектром, испускаемое туманностями — оболочками сверхновых звезд, объясняется как раз подобными движениями космических электронов в межзвездных магнитных полях. Согласно гипотезе, разви-

*) Г. И. Будкер, УФН 89, 553 (1966).

ваемой В. Л. Гинзбургом и И. С. Шкловским, «магнитно-тормозное» излучение заряженных частиц позволяет обнаружить области генерации космических лучей.

Параллельно с ростом энергии «зондирующих» частиц шел интенсивный рост техники физического эксперимента, использующей во всех областях физики высоких энергий новейшие технические достижения. Одним из основных приборов, позволяющих детально исследовать взаимодействия частиц (особенно многочастичные), стали пузырьковые камеры, наполненные жидким водородом или тяжелыми жидкостями. Размеры этих камер сейчас достигают 2 м (Дубна, Институт теоретической и экспериментальной физики — ИТЭФ в Москве). Для измерения сотен тысяч фотографий, получаемых на камерах, созданы автоматизированные устройства, данные с которых обрабатываются на быстродействующих электронных вычислительных машинах. Широкое распространение в опытах на ускорителях получили искровые камеры, позволяющие с высокой точностью определять координаты траекторий частиц. Существенно расширили возможность физического эксперимента трековые приборы нового типа — искровые камеры с большим зазором (Чиковани, Алиханян, Долгошеин). Использование проволочных искровых камер, работающих «в линию» с вычислительными машинами (Дубна), позволило создать спектрометры с высоким разрешением и большой скоростью регистрации частиц.

Основными детекторами частиц в опытах на ускорителях стали быстродействующие сцинтилляционные и черенковские счетчики; последние основаны на открытом С. И. Вавиловым и П. А. Черенковым излучении, сопровождающем частицы, которые движутся со скоростью, большей скорости света в среде (см. стр. 245 настоящей статьи). Основанные на этом явлении счетчики в некоторых случаях имеют большие преимущества перед счетчиками других типов. Для исследования редких процессов распада и взаимодействия частиц были созданы комплексные экспериментальные установки, содержащие большое число таких детекторов и регистрирующие частицы с точностью, лучшей 10^{-9} сек (Дубна, ИТЭФ).

Все эти новые исключительно мощные средства исследования в огромной степени расширили возможности проникновения в природу материи. Когда зондами служили α -частицы с энергией 3—5 Мэв, удалось проникнуть в глубь атома вплоть до расстояний порядка 10^{-12} см, и при этом было открыто атомное ядро. Но при зондировании электронами с энергией 700 Мэв оказалось возможным изучать уже структуру самих нуклонов, образующих ядро и считавшихся ранее «истинными» элементарными частицами, «кирпичиками мироздания». При этом удалось проникнуть вглубь еще на два порядка дальше — вплоть до расстояний $2 \cdot 10^{-14}$ см. Наконец, протоны с энергиями, измеряемыми гигаэлектрон-вольтами и десятками гигаэлектрон-вольт, неожиданно открыли целый новый мир — более двухсот новых частиц. Среди них встречаются долгоживущие, со временем жизни 10^{-6} — 10^{-10} сек, точнее, «долгоживущие» в я д е р н о м в р е м е н и, единица которого равна 10^{-22} сек, а потому частица, «живущая» 10^{-10} сек по нашему времени, «живет» 10^{12} единиц по ядерному времени, т. е. может быть даже названа «стабильной». Наряду с этими долгоживущими частицами в последние годы открыто множество короткоживущих частиц — резонансов с временами жизни, меньшими 10^{-20} сек.

Основной задачей физики элементарных частиц является исследование взаимодействий между этими частицами. Известны четыре типа взаимодействия: сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное.

Сильное взаимодействие, характеризующееся очень малым радиусом ($\sim 10^{-13}$ см), впервые было обнаружено при изучении атомных ядер. Сближаясь на расстояния, меньшие 10^{-13} см, сильно взаимодействующие частицы, так называемые адроны, притягиваются друг к другу или отталкиваются друг от друга с такой интенсивностью, что энергия их взаимодействия может стать сравнимой с их массой. Экспериментальное исследование сильного взаимодействия происходит в нескольких различных направлениях.

Большой и ценный материал в области энергий до 1 Гэв накоплен на синхротроне в Дубне. На этом ускорителе, максимальная энергия которого 680 Мэв, изучались взаимодействия протонов, нейтронов и π -мезонов с протонами и ядрами. В ходе этих исследований были установлены свойства нуклон-нуклонного и π -мезон-нуклонного рассеяния в широком интервале энергий (Б. М. Понтекорво, В. П. Джелепов, М. Г. Мещеряков и др.).

Сильные взаимодействия при энергиях порядка нескольких Гэв — это область исследования K -мезонов, гиперонов и бозиниства резонансов. На синхротроне в Дубне был открыт антисигмаминус гиперон, обнаружен Λ_η -резонанс и определены свойства некоторых других резонансов (В. И. Векслер, И. В. Чувило, А. В. Любимов). На синхротроне в Москве (ИТЭФ) был открыт мезонный резонанс с массой 1600 Мэв (Смолянкин).

Сильное взаимодействие при предельно высоких энергиях служит для выяснения так называемых асимптотических свойств сильного взаимодействия. В связи с этим представляют большой интерес опыты по измерению сечений рассеяния частиц высоких энергий на различные углы. В опытах на синхротроне в Дубне было показано, в частности, что действительная часть амплитуды нуклон-нуклонного рассеяния на угол 0° сравнима с мнимой частью (Струнов, Свиридов). В опытах на искусственных спутниках серии «Протон» были получены предварительные данные о сечении взаимодействия протонов с ядрами углерода (Н. Л. Григоров).

Теория сильного взаимодействия до сих пор не построена. Методы теории возмущений здесь неприменимы из-за большой энергии взаимодействия. Основные усилия теоретиков были направлены на развитие подхода, использующего то важное обстоятельство, что причинности (отсутствие в природе сверхсветовых сигналов) приводит к аналитичности амплитуд, описывающих процессы взаимодействия частиц. Аналитичность амплитуд позволяет устанавливать для них так называемые дисперсионные соотношения, доказательство которых было дано Н. Н. Боголюбовым. Основываясь на свойствах аналитичности и так называемого кроссинга, И. Я. Померанчук сформулировал теорему о равенстве сечений взаимодействия протона с протоном и антипротона с протоном при предельно высоких энергиях. Эта теорема подтверждается данными опыта в исследованиях сильных взаимодействий в области энергий до 30 Гэв. Теория сильных взаимодействий при предельно высоких энергиях, основанная на свойстве аналитичности амплитуды как функции углового момента, была развита в работах И. Я. Померанчука и В. Н. Грибова.

Ряд важных свойств амплитуд в пороговых точках (при малых относительных энергиях и вблизи порогов рождения частиц) был исследован в работах А. Б. Мигдала, В. Н. Грибова, А. И. Базя и др. Уравнения для определения положения особенностей амплитуд были получены Л. Д. Ландау.

В последние годы значительные усилия направлены на выяснение свойств симметрии сильного взаимодействия, которые могли бы обобщить понятие изотопической инвариантности (зарядовой независимости)

сильного взаимодействия. Схемы высших симметрий, особенно так называемой SU_3 -симметрии, позволили сделать ряд предсказаний, находящихся в хорошем согласии с опытом, и, в частности, систематизировать известные адроны*). Однако многое в этой области еще не ясно.

Экспериментальное исследование слабого взаимодействия развивалось как в области низких энергий, так и в области высоких энергий.

Исследование β -распада нейтрона и атомных ядер дало ряд важных результатов, к которым относятся точное измерение времени жизни



И. Я. Померанчук.

нейтрона (П. Е. Спивак), измерение поляризации электронов (П. Е. Спивак, А. И. Алиханов), установление верхней границы для двойного β -распада ядра Ca^{48} (С. Ю. Лукьянов).

В последние годы исследования при низких энергиях позволили обнаружить новый вид слабого взаимодействия — так называемые нечетные ядерные силы (Ю. Г. Абов, В. М. Лобашов). Эти силы, которые на 6 порядков слабее обычного ядерного взаимодействия, не сохраняют пространственную четность, что приводит, в частности, к тому, что γ -кванты в электромагнитных переходах в ядрах оказываются циркулярно-поляризованными.

При высоких энергиях советские экспериментаторы также получили ряд важных результатов. Была измерена вероятность β -распада π -мезона:

*) См., например, статью Гелл-Манна, Розенфельда и Чу «Сильные взаимодействия», УФН 83, 695 (1964).

(Ю. Д. Прокошкин) и тем самым проверена теория сохраняющегося векторного тока. Была измерена поляризация мюонов в $K_{\mu 3}$ -распаде (А. О. Вайсенберг) и в $\mu_{e 2}$ -распаде (А. И. Алиханов). В Дубне был исследован захват мюонов ядрами, в частности, в He^3 (Б. М. Понтекорво). Точное измерение симметрии электронов в распаде поляризованного мюона было осуществлено И. И. Гуревичем.

Исследование распадов нейтральных K -мезонов проводилось на синхротроне в Дубне. В частности, там были прямо измерены распады $K_{20} \rightarrow 3\pi_0$.

Следует отметить также работы М. А. Маркова и Б. М. Понтекорво, в которых были предложены нейтринные опыты и сделаны оценки, показывающие осуществимость этих опытов. Опыты впоследствии были проделаны в Брукхэйвенской лаборатории и в Европейской международной лаборатории ЦЕРН.

Советские физики внесли также важный вклад в развитие теории слабого взаимодействия. В современной теории универсального слабого взаимодействия важную роль играет гипотеза о сохранении векторного слабого тока и о сходе между этим током и обычным электромагнитным током. Гипотеза эта была впервые рассмотрена в работе С. С. Герштейна и Я. Б. Зельдовича. Неотъемлемой частью современной теории слабого взаимодействия является теория двухкомпонентного нейтрино, предложенная Л. Д. Ландау.

В отличие от электродинамики, теория слабого взаимодействия является феноменологической. Она хорошо описывает явления при сравнительно низких энергиях, но наталкивается на серьезные трудности при переходе к более высоким энергиям ($\geq 100 \text{ ГэВ}$ в системе центра инерции взаимодействующих частиц). Это обстоятельство было обнаружено еще в 1934 г. И. Е. Таммом при попытке построить теорию β -сил. Дело в том, что слабое взаимодействие между частицами быстро растет при сближении их; как показал теоретический анализ, оно может стать очень сильным на малых расстояниях. Интересные результаты в этом направлении получены Б. Л. Иоффе, М. А. Марковым.

Фундаментально важные результаты были получены за последние десятилетия в исследовании несохранения пространственной четности и комбинированной четности (см. стр. 217). Открытие в 1964 г. нарушения CP -инвариантности означает, по-видимому, что элементарные частицы подобно живым существам, дисимметричны. Дальнейшее исследование этого вопроса может привести к очень важным последствиям.

Электромагнитное взаимодействие является наиболее изученным. По существу все остальные области физики (оптика, акустика, физика твердого тела и т. д.) имеют дело только с электромагнитным взаимодействием. Когда говорят об электромагнитном взаимодействии элементарных частиц, то имеют в виду изучение этого взаимодействия либо при высоких энергиях, либо при низких энергиях, но с такой точностью, чтобы обнаружить структуру элементарных частиц (их размеры, распределение в них зарядов и токов).

Экспериментальное исследование взаимодействия фотонов с нуклонами проводилось до последнего времени лишь в ФИАН (Москва) на электронных синхротронах с энергией 270 и 650 МэВ (П. А. Черенков, А. М. Балдин и др.). Здесь получены интересные результаты по рассеянию фотонов нуклонами и фоторождению π -мезонов на водороде и дейтерии. В Дубне была проведена широкая программа по изучению μ -атомов, т. е. электромагнитного взаимодействия μ -мезонов с электронами и ядрами. Экспериментальному исследованию были подвергнуты электромагнитные распады мезонов (π^0 , ω^0 , ρ^0) (Дубна, ИТЭФ).

В настоящее время разворачиваются работы на Харьковском ускорителе с энергией 2 Гэв, на ускорителе со встречными пучками в Новосибирске.

Теоретические работы советских физиков в области электромагнитного взаимодействия охватывают широкий диапазон: начиная с исследований вопроса о том, в какой степени непротиворечивой является обычная лагранжева формулировка квантовой электродинамики (Л. Д. Ландау, И. Я. Померанчук), и кончая расчетами многочисленных конкретных процессов. Еще в 1930 г. И. Е. Таммом была получена формула для сечения комптоновского рассеяния фотона электроном (формула Клейна — Нишины — Тамма). Ряд эффектов был рассчитан И. Я. Померанчуком (аннигиляция орто- и парапозитрония, сдвиг уровней в μ -мезоатомах, рассеяние света светом).

Полуфеноменологический анализ взаимодействия фотонов с нуклонами при энергиях порядка нескольких сот Мэв был проведен А. М. Балдиным.

Дальнейшее исследование электромагнитного взаимодействия представляет интерес с нескольких точек зрения, из которых мы укажем на две самые существенные. Во-первых, — использование электромагнитного взаимодействия для исследования структуры адронов, во-вторых, поиски таких эффектов, которые показали бы, что и для лептонов квантовая электродинамика справедлива не для сколь угодно малых расстояний. Пока ни одного такого эффекта обнаружить не удалось.

Этими краткими замечаниями мы вынуждены закончить наш неполный обзор работ по элементарным частицам, выполненных в СССР.

Физика атомного ядра

Быстрый рост этой важной области физики начался после того, как почти 50 лет назад Резерфорд осуществил первую ядерную реакцию. Необходимым условием возникновения ядерной реакции является проникновение налетающей быстрой частицы в ядро-мишень, а для этого «снаряды», бомбардирующие мишень, должны обладать достаточной энергией, если, конечно, они, так же как и ядра, несут положительный заряд.

Единственным источником подобных быстрых частиц в то время, 50 лет назад, были радиоактивные препараты, испускающие α -частицы с энергией в несколько Мэв. Этот источник — очень слабый как по числу частиц, так и по их энергии. Поэтому особенно важную роль в развитии ядерной физики сыграло создание ускорителей частиц, позволивших получать контролируемым образом неизмеримо более мощные потоки быстрых частиц. Все это привело к широко известным успехам в познании структуры атомного ядра и использовании ядерной энергии. Последовательное развитие ускорителей привело в конце концов к тому, что из собственно физики атомного ядра выделилась в качестве самостоятельной области — физика высоких энергий, или, что то же самое, физика элементарных частиц, о которой была речь в предыдущем разделе.

В то время, когда Резерфорд осуществил первую ядерную реакцию (1918 г.) или, как тогда говорили, «трансмутацию элементов», физика атомного ядра в России находилась на нулевом уровне: не было ни одного физика, который бы вел работы в области естественной радиоактивности, откуда и проистекли все успехи ядерной физики, начиная с самого открытия атомного ядра.

Только после революции в ряде институтов начинаются работы в области ядерной физики. В Ленинграде в этом отношении большую

инициативу проявил А. Ф. Иоффе, всегда настоятельно подчеркивавший важность изучения атомного ядра. В созданном им Физико-техническом институте был выполнен ряд важных работ, а главное — появились молодые талантливые ученые (И. В. Курчатов, братья Алихановы, А. И. Лейпунский и др.), вокруг которых группировались еще более молодые ученики. Большую активность проявлял в Радиевом институте Л. В. Мысовский, приступивший перед войной к строительству первого советского циклотрона. В Москве в Физическом институте им. П. Н. Лебедева по инициативе С. И. Вавилова развернулись работы по ядерной физике (В. И. Векслер, Л. В. Грошев, И. М. Франк, Н. А. Добротин и др.). Наконец, в Харькове в Украинском физико-техническом институте было предпринято строительство большого электростатического генератора (А. Ф. Вальтер, К. Д. Синельников, А. И. Лейпунский и др.).

Все это создало условия, благодаря которым в момент острой необходимости налицо оказался опыт и кадры, и в послевоенные годы, когда проблема атомного ядра вышла на первый план в качестве важнейшей государственной задачи, в этой труднейшей области были достигнуты столь большие успехи, что они выдвинули Советский Союз на одно из первых мест в мировой науке.

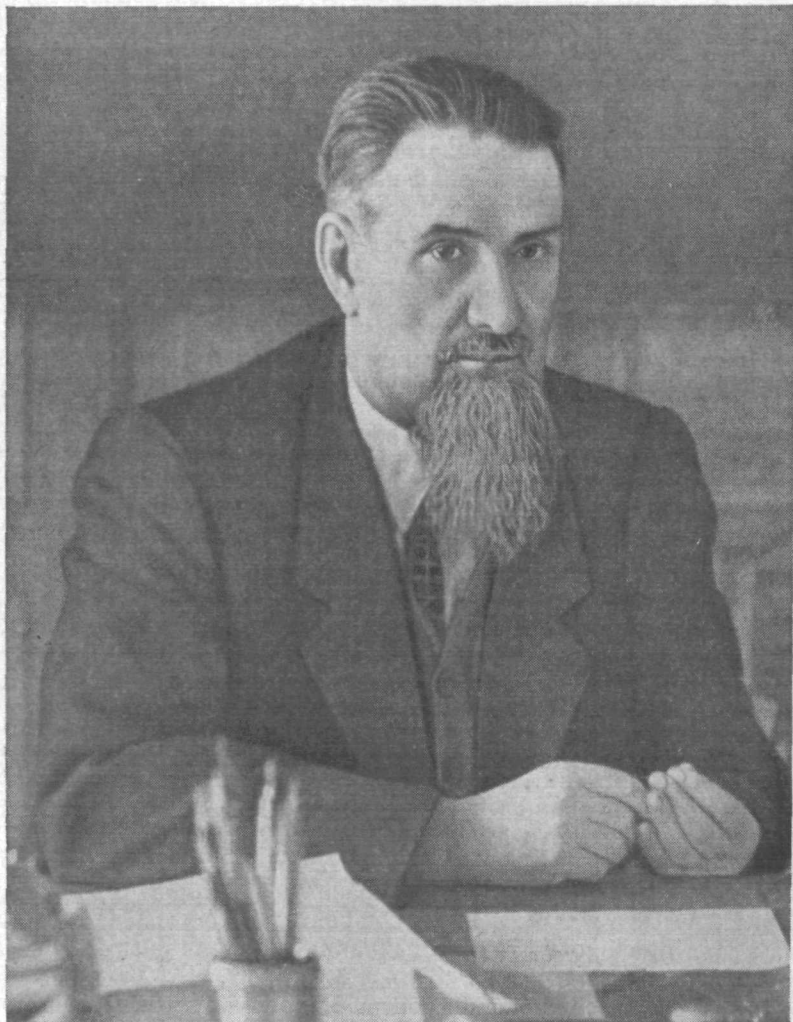
Не говоря уже об известном всем создании в неожиданно быстрые сроки грозного ядерного оружия, научные исследования и мирные применения атомной энергии — пуск первой в мире атомной электростанции, атомный ледокол «Ленин», разнообразнейшие применения искусственно-радиоактивных изотопов во всех областях науки и техники — таков неполный перечень успехов в применении ядерной физики, которые относятся главным образом к последним 20—25 годам. Однако успешная экспериментальная и теоретическая работа в области физики атомного ядра велась в течение всех 50 лет. Говоря о достижениях последних лет, мы не должны забывать и о первых работах, которые уже вошли во все учебники, и о тех, кто в трудных условиях при недостатке опыта и аппаратуры их осуществлял.

Конец тридцатых и начало сороковых годов характеризуются интенсивным развитием работ по изучению деления ядер тяжелых элементов. Советскими физиками был получен в это время ряд важных результатов, сыгравших существенную роль в решении задачи получения и использования ядерной энергии. Как известно, в основе ядерных цепных реакций лежит процесс деления тяжелых ядер под действием нейтронов. Качественное объяснение этого явления с точки зрения электрокапиллярной модели было впервые дано в 1939 г. Я. И. Френкелем (одновременно и независимо это представление было развито Н. Бором и Дж. Уилером). В 1940 г. К. А. Петржаком и Г. Н. Флеровым было показано, что процесс деления урана происходит также спонтанно, хотя и с очень малой вероятностью. Вслед за этим Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон показали (1933—1940), что при небольшом обогащении естественной смеси изотопов урана легким изотопом U^{235} возможен цепной процесс с использованием обыкновенной воды в качестве замедлителя.

В дальнейшем советскими учеными (И. В. Курчатов, А. И. Алиханов, В. С. Фурсов, А. П. Александров, А. И. Лейпунский, Д. И. Блохинцев, Н. А. Доллежалъ и др.) было создано много экспериментальных ядерных реакторов для научно-исследовательских целей и проведены многочисленные исследования по важнейшим проблемам ядерной физики. Эти работы создали фундамент для развития прикладной ядерной физики. Важнейшим итогом здесь явилось создание ядерного оружия, а в области мирных применений — уже упомянутое развитие ядерной энергетики, причем опыт эксплуатации построенной в СССР первой атомной электростанции

позволил наметить большую программу развития ядерной энергетической промышленности. Получение с помощью ядерных реакторов большого количества искусственных радиоактивных изотопов привело к широкому развитию метода «меченых атомов» в металлургии, биологии, медицине и сельском хозяйстве.

Душой всей этой огромной работы был И. В. Курчатов. Ранее он своими экспериментальными работами в области физики диэлектриков



И. В. Курчатов.

и ядерной физики проявил талант исследователя. В этой же новой области он выступает не только как выдающийся ученый, но и как организатор огромной энергии и широкого размаха. Он становится настоящим государственным деятелем большого масштаба, выполняющим важнейшую и ответственнейшую миссию для страны *).

*) Волнующая история этой деятельности Курчатова хорошо описана в недавно вышедшей книжке И. Н. Головина «Курчатов», М., 1967.

Отметим теперь ряд важных работ физического характера, относящихся к ядерной физике и выполненных в довоенное время.

Представление о том, что атомные ядра не содержат электронов, но состоят из положительно заряженных протонов и не имеющих зарядов нейтронов, было сформулировано в 1932 г. Д. Д. Иваненко. Общепринятое в настоящее время представление о возникновении ядерных сил в результате обмена частицами было одновременно развито И. Е. Таммом и Д. Д. Иваненко (1934). Хотя первоначальное предположение о том, что обмен этот осуществляется через посредство электронов и нейтрино, ведет, как показали расчеты И. Е. Тамма, к допущению существования сил, по величине на много порядков меньших реальных сил, сдерживающих атомное ядро, основные идеи этой теории остались руководящими и поныне. В самом деле, как показал впоследствии Юкава, ядерные силы получаются должного порядка величины, если обмен осуществляется предсказанными им и вскоре открытыми более тяжелыми, чем электроны, π -мезонами.

И. В. Курчатовым, Б. В. Курчатовым, Л. И. Русиновым и Л. В. Мысовским было открыто (1935) замечательное явление ядерной изомерии радиоактивных элементов. На примере изотопов брома было показано, что существуют радиоактивные ядра, которые являются изотопами и изобарами, т. е. обладают в точности одинаковым составом, но имеют существенно различные периоды распада. Так, например, изотоп брома Br^{80} обнаруживает два периода: 18 мин. и 4,4 часа. Это явление оказалось очень распространенным. Оно было названо ядерной изомерией ввиду некоторой аналогии с явлением, известным в органической химии, где изомерными называются молекулы, имеющие одинаковый состав, но различное строение. Причина ядерной изомерии, однако, не в различии строения изомерных ядер, а в существовании для γ -излучения метастабильных уровней ядра, переход из которых в нормальное состояние более или менее сильно «запрещен»: вследствие малой вероятности перехода ядра, попавшие на такой метастабильный возбужденный уровень, будут разряжаться с испусканием γ -лучей в течение длительного промежутка времени.

Ряд важных работ по исследованию β -распада (β -спектры, внутренняя конверсия) был выполнен А. И. Алихановым, А. И. Алиханяном и их сотрудниками при помощи магнитного β -спектрографа. Важным этапом в экспериментальном доказательстве существования нейтрино были опыты А. И. Лейпунского, показавшие несоблюдения закона сохранения импульса в системе «электрон — ядро отдачи». Л. В. Грошев и И. М. Франк одни из первых весьма подробно изучили процесс рождения пар электрон-позитрон гамма-квантами и показали справедливость теории этого процесса, развитой Дираком.

В послевоенные годы развитие атомной энергетики стимулировало резкое возрастание размаха исследований по ядерной физике. Не только были расширены старые центры ядерных исследований, такие, как ЛФТИ, Радиевый институт, ФИАН, ХФТИ, но и был создан ряд новых исследовательских центров. Среди них такие широко известные теперь учреждения, как Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова, Институт теоретической и экспериментальной физики (А. И. Алиханов), Физико-энергетический институт в Обнинске (Д. И. Блохинцев, А. И. Лейпунский), Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ (Д. В. Скобельцын, С. Н. Вернов).

Со второй половины пятидесятих годов начала развиваться плеяда ядерных центров в столицах союзных республик — Киеве, Ташкенте, Тбилиси, Минске, Риге, Алма-Ате. К этому списку надо добавить

организованный в 1956 г. Объединенный институт ядерных исследований в Дубне, в лабораториях которого работают совместно ученые большинства социалистических стран.

Результатом интенсивного развития исследований, которое происходило и в СССР, и за рубежом, явился прежде всего быстрый прогресс методики ядерного эксперимента, который стал в наши дни весьма и весьма изощренным. На смену гейгеровским счетчикам явились сцинтилляционные, а в шестидесятые годы — полупроводниковые детекторы частиц и гамма-квантов, сочетающие высокую эффективность, быстрдействие и спектрометрические свойства. Во всеобщее употребление вошли разделенные изотопы элементов, многоканальные и многомерные анализаторы импульсов, наносекундная электроника. Получает применение непосредственное использование электронных вычислительных машин в эксперименте. Электростатические генераторы, циклотроны, исследовательские реакторы стали неотъемлемой принадлежностью ядерных лабораторий. Отметим некоторые из наиболее примечательных установок этого рода. Одними из первых ускорителей, использующих принцип автофазировки В. И. Векслера, являются доныне работающие в ФИАН электронные синхротроны на 30 Мэв и 270 Мэв. Они интенсивно используются для изучения фотоядерных реакций (Л. Е. Лазарева, П. А. Черенков, А. Н. Горбунов). Для этих же целей в последние годы в Институте физических проблем используется гораздо более сильноточный электронный ускоритель — микротрон, также изобретенный В. И. Векслером. Эта машина получила «путевку в жизнь» в результате разработок С. П. Капицы. В Дубне в Лаборатории ядерных реакций с 1960 г. действует циклотрон с диаметром полюсов 300 см, специально приспособленный для ускорения тяжелых ионов (кислород, неон, аргон и др.). Он дает на порядок более мощные пучки ионов по сравнению с зарубежными ускорителями, что оказалось решающим для работ по синтезу элементов 102 и 104, проведенных Г. Н. Флеровым с сотрудниками. Элемент 104 получил, как известно, название курчатовий. В другой дубненской лаборатории — Лаборатории нейтронной физики — действует импульсный реактор на быстрых нейтронах ИБР, разработанный в Физико-энергетическом институте (Д. И. Блохинцев, И. И. Бондаренко, Ю. Я. Стависский и др.). Этот оригинальный реактор при средней мощности 6 кВт дает для экспериментов, в которых необходимо фиксировать или измерять энергию медленных нейтронов, такие же или лучшие возможности, чем обычный стационарный реактор мощностью в десятки мегаватт. Успешный опыт использования реактора ИБР стимулировал создание в ряде стран проектов импульсных реакторов на несколько порядков большей мощности. К числу исследовательских реакторов, характеризующихся наибольшим потоком нейтронов (порядка 10^{15} нейтронов/см²сек) относится реактор СМ-2 Института реакторов в Мелекесе, разработанный под руководством С. М. Фейнберга.

За послевоенные десятилетия произошло огромное обогащение фактических сведений об атомных ядрах. Были подробно исследованы сотни разнообразных ядерных реакций. Были изучены свойства основных и многих нижних возбужденных состояний всех стабильных и порядка тысячи радиоактивных ядер. Хотя до настоящего времени и не удалось еще создать единой замкнутой теории ядерных сил и строения ядер, впечатляющий прогресс в описании и объяснении ядерных свойств был достигнут с помощью нескольких весьма общих и подробно разработанных ядерных моделей. К ним относятся: статистическая и оптическая модели ядерных реакций, оболочечная модель строения ядер, обобщенная модель, учитывающая коллективные движения ядер (вращения и поверхностные колебания), связанные с их несферичностью и деформируемостью, и неко-

торые другие. Советские физики активно участвовали как в накоплении экспериментальных данных о ядрах, так и в развитии теоретических представлений. В рамках этой статьи можно лишь назвать некоторые направления работы; чтобы не ограничиваться сухим перечнем, мы кратко упомянем также о нескольких из наиболее интересных работ, выполненных в последние годы.

Изучение характеристик энергетических уровней атомных ядер составляет предмет так называемой ядерной спектроскопии, причем обычно речь идет о нижних возбужденных уровнях, легче поддающихся исследованию и теоретическому описанию. В Советском Союзе исследования в этом направлении велись весьма широко и ежегодно обсуждались на традиционных совещаниях по ядерной спектроскопии, основателем которых является Б. С. Джелепов. Наряду с альфа-, бета- и гамма-спектроскопией искусственно-радиоактивных изотопов (Б. С. Джелепов, С. А. Баранов и др.) все большее значение приобретает информация, получаемая при изучении ядерных реакций и новых типов радиоактивного распада. Что касается ядерных реакций, то здесь нужно отметить получившие мировую известность работы Л. В. Грошева и сотрудников по исследованию спектров гамма-лучей, возникающих при захвате нейтронов ядрами, исследования кулоновского возбуждения ядер (теория этого процесса была заложена К. А. Тер-Мартirosяном, эксперименты велись И. Х. Лембергом и др. в ЛФТИ), исследования «стриппинга» (обдирания) дейтонов и др. Два новых процесса распада ядер были открыты в Лаборатории ядерных реакций в Дубне. Это — испускание протонов вслед за бета-распадом (запаздывающие протоны, В. А. Карнаухов) и спонтанное деление тяжелых ядер, идущее со скоростью до 20 порядков большей скорости обычного спонтанного деления (С. М. Поликанов). В последнем случае, по-видимому, деление происходит из изомерного состояния ядер, отличающегося от основного большой деформированностью.

В области теории очень существенной была работа Н. Н. Боголюбова по применению теории сверхтекучести к атомным ядрам; на этом пути удалось количественно описать многие особенности спектра возбуждений ядер (С. Т. Беляев, В. Г. Соловьев). Большой интерес вызвали работы А. С. Давыдова по теории ядер, не обладающих аксиальной симметрией, и работы А. Б. Мигдала, применившего к ядрам теорию квантовой ферми-жидкости, основанную Л. Д. Ландау. Значительное внимание уделялось изучению свойств малонуклонных систем, особенно теоретическому (Я. А. Смородинский, К. А. Тер-Мартirosян, Фаддеев и др.). Анализ стабильности легчайших ядер, проведенный А. И. Базем, В. И. Гольданским и Я. Б. Зельдовичем, стимулировал поиски таких «странных» ядер, как недавно открытый гелий-8. Возбужденные уровни легчайшего из способных возбуждаться ядер — гелия-4 — впервые исследовались экспериментально в работах Н. А. Власова, И. Я. Барита. В самое последнее время в Дубне путем опытов с поляризованными нейтронами и поляризованной дейтоновой мишенью была разрешена существовавшая многие годы неоднозначность в амплитудах рассеяния нейтрон — дейтон.

В области изучения ядерных реакций, пожалуй, больше всего было сделано с нейтронами, что определялось запросами ядерной техники. До 1-й Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии (1955) публикация работ этого направления во всех странах ограничивалась, и советским физикам пришлось развивать нейтронные исследования самостоятельно. Женевская конференция показала высокий уровень таких работ в области изучения нейтронных сечений и нейтронных резонансов делящихся и неделящихся ядер (В. В. Владимирский, С. Я. Никитин, В. И. Мостовой, М. И. Певзнер, М. В. Пасечник и др.).

Многочисленные продолжения получила работа И. М. Франка и сотрудников, развивших импульсный метод изучения переноса нейтронов в средах. В ФИАН был создан также оригинальный метод изучения сечений нейтронных реакций, основанный на измерении времени замедления нейтронов, который продолжает использоваться до настоящего времени. В последующие годы нейтронные измерения продолжали развиваться (поляризационные эффекты — И. И. Левинтов, наносекундная методика в применении к быстрым нейтронам — Н. А. Власов, В. Сидоров и др.; спектрометрия по времени пролета в резонансной области с высоким разрешением — установка с линейным электронным ускорителем ИАЭ, импульсный реактор с микротронным инжектором в Дубне и др.). Теоретическая интерпретация полученных данных о свойствах высоковозбужденных состояний ядер и характеристиках ядерных реакций основывалась на статистической модели ядра, основы которой были заложены Л. Д. Ландау еще до войны, и на оптической модели ядра. В дальнейшее развитие этих теорий внесли вклад М. В. Струтинский, П. Э. Немировский и др. Важные экспериментальные исследования деления ядер были выполнены Н. А. Перфиловым, Г. Е. Беловицким, Ю. С. Замятниным, Л. А. Микаэляном и др. В исследованиях ядерных реакций под действием быстрых заряженных частиц (П. А. Ключарев, О. Ф. Немец, Оглоблин и др.) и быстрых нейтронов уже довольно давно четко определилась недостаточность модели составного ядра и необходимость учета прямого механизма ядерных реакций. Новое направление в теории прямых ядерных реакций развил в последние годы И. С. Шапиро.

В заключение необходимо отметить все возрастающее использование методов ядерной физики в смежных областях науки и в технике. Примерами являются нейтронный активационный анализ, нейтронный и гаммакаротаж в геологической разведке, нейтронно-дифракционный структурный анализ кристаллов, в особенности кристаллов магнетиков (см. недавно выпущенную монографию Ю. А. Изюмова и Р. П. Озерова), многочисленные применения эффекта Мёссбауэра в физике твердого тела и химии (эксперименты — В. И. Гольданский, В. С. Шпинель и др., теория — Ю. М. Каган, М. А. Кривоглаз и др.). Технически более сложным является метод неупругого рассеяния медленных нейтронов, позволяющий изучать спектры частот и дисперсионные соотношения для фононов и магнонов, динамику атомов в жидкостях и молекулах. Ряд результатов в этом направлении уже получен в ИАЭ и в Дубне, причем импульсный реактор оказался весьма перспективной установкой для такого рода исследований. Совсем новое перспективное направление изучения кристаллов было начато недавно работами А. Ф. Тулинова (МГУ), открывшего так называемый эффект теней — влияние упорядоченного расположения атомов в кристаллах на угловое распределение быстрых заряженных частиц, рассеянных или испущенных ядрами кристалла.

Физика плазмы

Наиболее бурное развитие физики плазмы в СССР началось в послевоенные годы, но фундамент этих исследований был заложен гораздо раньше теоретической работой А. А. Власова (1938), в которой для описания коллективных процессов в плазме было предложено кинетическое уравнение с самосогласованным полем, и работой Л. Д. Ландау (1937), в которой был получен член столкновений для заряженных частиц. Уравнение Власова с членом столкновений в форме Ландау прочно вошло в мировой фонд науки, оно составляет основу для понимания процессов в полностью ионизованной плазме. Большую роль в развитии

теории плазмы сыграла также работа Л. Д. Ландау 1947 г., в которой математически строго была решена задача о колебаниях плазмы и было показано, что волны в плазме испытывают специфическое затухание, связанное с их взаимодействием с резонансными частицами.

Что касается экспериментальных исследований довоенного периода, то они в значительной мере были стимулированы чисто практическими потребностями — созданием люминесцентных светильников и газоразрядных ламп (газотронов, тиратронов и т. п.) и были связаны с изучением элементарных процессов в газовом разряде и макроскопических характеристик разряда. Из советских физиков, работавших и работающих в этой области, отметим Н. А. Капцова (зажигание газового разряда, корона), Г. В. Спивака (роль метастабильных атомов в газовом разряде, теория зондов, коэффициенты аккомодации), Н. Д. Моргулиса (катодное распыление), В. Л. Грановского (плазма газового разряда). Из работ, связанных с проблемой создания экономичных газосветовых ламп, необходимо отметить работы В. А. Фабриканта (изучение разряда в парах металлов), Б. Н. Клярфельда, А. М. Шемаева.

Бурное развитие атомной физики в послевоенные годы очень скоро повлияло и на другие области физики, в частности на физику плазмы. В работах по электромагнитному разделению изотопов (Л. А. Арцимович, П. М. Морозов, В. С. Золотарев) впервые пришлось столкнуться с необычайно сложными процессами в плазме, находящейся в сильном магнитном поле. В полном объеме изучение этих процессов началось в исследованиях по управляемым термоядерным реакциям.

В 1950 г. А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм высказали идею магнитной термоизоляции плазмы для получения управляемых термоядерных реакций. Вскоре под руководством Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича были начаты экспериментальные и теоретические исследования с целью овладения управляемым термоядерным синтезом. В первых экспериментах по сильноточным разрядам (Л. А. Арцимович, А. М. Андрианов, О. М. Базилевская, В. С. Комельков, С. Ю. Лукьянов, Н. В. Филиппов и др.) удалось достигнуть очень высокой температуры и тем самым подтвердить принцип магнитной термоизоляции. Были обнаружены нейтроны и жесткое рентгеновское излучение. Однако вскоре эти эксперименты натолкнулись на неустойчивость плазмы, и исследования по управляемым термоядерным реакциям перешли на рельсы кропотливого изучения физических свойств плазмы. Для этой цели использовались тороидальные разряды с сильным продольным полем (Н. А. Явлинский), ловушки с магнитными пробками (Г. И. Будкер, И. Н. Головин, И. С. Иоффе), системы с ВЧ полями (С. М. Осовец) и т. д. Все эти исследования подготавливают научную основу для решения проблемы управляемого синтеза легких ядер.

Работы советских физиков по управляемым термоядерным реакциям составляют одно из крупных достижений советской науки. Советские ученые внесли существенный, а в некоторых случаях основной вклад в развитие теории неустойчивости и коллективных процессов в плазме (В. Д. Шафранов, Б. Б. Кадомцев, В. П. Силин, А. А. Вedenov, Е. П. Велихов и др.), теории электромагнитных волн в плазме (В. Л. Гинзбург, К. Н. Степанов и др.), теории нелинейных волн в плазме (Р. З. Сагдеев, В. И. Карпман). Эксперименты по стабилизации плазмы в магнитных ловушках (М. С. Иоффе), по турбулентному нагреву плазмы (Е. К. Завойский), по взаимодействию пучков с плазмой (Я. Б. Файнберг) нашли заслуженное признание в мировой научной литературе. Работы по физике плазмы ведутся в целом ряде других институтов: ЛФТИ (Б. П. Константинов, В. Е. Голант, Н. В. Федоренко), ФИАН (М. С. Рабинович), Институт ядерной физики СО АН СССР (Г. И. Будкер, Р. З. Сагдеев).

В настоящее время физика плазмы выросла в довольно крупный раздел современной физики. Выяснилось, что физические свойства плазмы проявляются в широком круге явлений в космосе, на Солнце, в ионосфере Земли. Появились новые прикладные проблемы использования плазмы в МГД преобразователях тепловой энергии в электрическую и в реактивных двигателях.

О п т и к а . Ф и з и к а а т о м о в и м о л е к у л

Большое значение этого отдела физики обусловлено, в частности, тем, что с ним сохраняет непосредственную связь оптическая промышленность, исключительно важная как с оборонной, так и с культурной точки зрения.

В интересной статье, написанной к пятидесятилетию Государственного оптического института (ГОИ) Д. С. Рождественский охарактеризовал культурное значение оптической промышленности следующими яркими словами: «Распространенность оптики — признак высоты культуры. Микроскоп, фотографический аппарат, зрительная труба или бинокль всегда отличали культурную семью. Оптическая промышленность — самая высокая промышленность и потому, что наиболее тонкая и трудная, и потому, что она быстрее всего ведет нас через микроскоп и зрительную трубу к культуре, подлинному научному материализму и к рассеянию предрассудков» *).

Каков же был уровень оптической промышленности в России до революции? По этому поводу мы имеем авторитетное свидетельство Д. С. Рождественского в той же статье; оно может быть кратко охарактеризовано словами: «Относительно 1917 г. больше приходится отмечать то, чего тогда не было». Далее Рождественский перечисляет существовавшие в то время небольшие мастерские с общим числом рабочих менее 1000 человек (сюда же входили рабочие мастерских, производивших оптические приборы военного назначения). «Не было ни одного вычислителя оптических систем, и никто в России не занимался оплотехникой. Поэтому заводы мало разбирались в существе дела и могли только рабски копировать заграничные образцы. Нигде не производились очки, геодезические инструменты, фотографические аппараты и объективы, кинематографические аппараты, микроскопы, научные инструменты» **).

Но уже в 1933 г. по данным, приведенным в той же статье, картина резко изменилась. Уже работали 7 заводов оптико-механической промышленности с 11 000 рабочих, производивших разнообразную номенклатуру оптических приборов военного, научного и бытового назначения. Если в 1917 г. не было ни одного вычислителя, то в 1933 г. в ГОИ было уже вычислительное бюро с несколькими десятками сотрудников, для которых «уже больше нет тайн и трудностей в сложном деле вычисления оптических систем вплоть до самых светосильных фотографических и микроскопических объективов». С тех пор прошло еще 34 года, и теперь наша оптическая промышленность полностью обеспечивает всеми необходимыми приборами Советскую Армию, Военно-Морской флот и авиацию, производит разнообразные вполне современные фотографические аппараты с превосходными объективами, вплоть до самых сложных, сделанными из советского оптического стекла, разнообразные научные приборы: микроскопы, астрономические трубы, спектральную аппаратуру и т. п.

*) Д. С. Рождественский, Судьбы оптики в СССР, «XV лет Государственного оптического института», сб. статей под редакцией С. И. Вавилова, 1934, стр. 25.

**) Там же, стр. 19—20.

Огромную роль в этом бурном развитии оптической промышленности сыграл Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова с его основателем Д. С. Рождественским и его преемником С. И. Вавиловым во главе.

Важнейшим сырьем для оптического производства является оптическое стекло. Перед революцией, в разгаре первой мировой войны, Россия оказалась в исключительно тяжелом положении, так как запасы необходимого для оснащения боевой техники оптического стекла, ввозившегося ранее из Германии, были ничтожными и были израсходованы в несколько месяцев. «В высшей степени своеобразное и трудное производство оптического стекла составляло к тому времени монополию лишь трех фирм на всем земном шаре и содержалось под величайшим секретом. В России нельзя было найти ни одного человека, хоть сколько-нибудь знакомого с этим вопросом, ни на каком языке нельзя было прочесть ни одной строчки, посвященной этой запретной теме»). Попытки варки оптического стекла, сделанные в 1916 г. по рецептам английской фирмы братьев Ченс, дали ничтожное количество стекла мало удовлетворительного качества. Одна из первых задач, которые поставила себе при организации ГОИ группа энтузиастов советской оптики во главе с Д. С. Рождественским, состояла в разработке своих собственных методов варки оптического стекла — методов, построенных на прочной основе широких научных физико-химических исследований этого своеобразного процесса, а не в виде «чего-то вроде замысловатого фокуса, сохраняемого строжайшими секретами»), каким была рецептура варки у зарубежных фирм. Заслуга разработки и усовершенствования этих методов принадлежит большому коллективу научных работников, в особенности И. В. Гребенщикову, Н. Н. Качалову, А. А. Лебедеву, А. И. Стожарову. Контроль процесса был очень облегчен благодаря разработанному И. В. Обреимовым остроумному методу быстрого определения показателя преломления стекла в виде куска неправильной случайной формы. Благодаря всем этим работам уже в 1925 г. Советский Союз мог полностью отказаться от импорта оптического стекла.

Для развития прикладной оптики большую роль сыграло создание советской школы оптиков-вычислителей (А. И. Тудоровский, Г. Г. Слюсарев, Е. Г. Яхонтов и др.). Были разработаны оригинальные методы расчета и составлены вспомогательные таблицы, облегчающие выбор сортов стекла и ход расчета. Построение отражательных объективов (Е. М. Брумберг и С. А. Гершгорин) позволило создать оригинальный тип ультрафиолетового микроскопа (Е. М. Брумберг). Совершенно своеобразная конструкция астрономических телескопов — зеркально-менисковая — создана Д. Д. Максutowым (1941). Был разработан также ряд оригинальных конструкций фотографических объективов (М. М. Русинов, Д. С. Волосов и др.). Остроумные методы контроля оптических систем были предложены В. П. Линником; ему же и А. А. Лебедеву принадлежит ряд оригинальных конструкций оптических приборов. Особо следует отметить создание и промышленную разработку всех типов спектральной аппаратуры, полностью обеспечившие многочисленные заводские лаборатории, научно-исследовательские институты и учебные заведения необходимыми приборами. Наконец, важнейшим достижением последнего времени явилось создание в ГОИ под руководством Ф. М. Герасимова советских дифракционных решеток высокого качества.

*) И. В. Г р е б е н щ и к о в и Н. Н. К а ч а л о в, в сб. «XV лет Государственного оптического института», стр. 160, 161.

**) Там же, стр. 170.

Важным разделом прикладной оптики является светотехника и непосредственно с ней связанная фотометрия. В области теоретических основ светотехники большое значение имеет разработанная советскими учеными, в особенности В. А. Фоком, А. А. Гершуном, М. М. Гуревичем и Н. В. Болдыревым, теория светового поля. В этой теории задача светотехники, т. е. задача о рациональном освещении, решается по образцу общей физической теории поля с введением «плотности световой энергии», «светового вектора» и с последующим математическим развитием теории с помощью векторного анализа. Значение этих работ ярко формулировал редактор вышедшего в США английского перевода книги А. А. Гершуна «Теория светового поля» Парри Мун, который подчеркнул, что изложенная в этой книге одним из ее пионеров теория представляет собой первый важный шаг в фотометрии со времени работ П. Бугера (т. е. середины XVIII столетия).

В области физической оптики работы советских физиков многочисленны и разнообразны. Выше уже упоминались классические работы Д. С. Рождественского по аномальной дисперсии в парах натрия, выполненные еще до революции. В этих работах Рождественский развил остроумный «метод крюков», позволивший удобно и быстро изучать дисперсию в парах металлов и извлекать из этих измерений точные значения вероятностей переходов и интенсивностей спектральных линий. Благодаря дальнейшему усовершенствованию методики, а именно построению флюоритового интерферометра, спроектированного Д. С. Рождественским, его ученики В. К. Прокофьев и А. Н. Филиппов могли расширить исследование аномальной дисперсии в ультрафиолетовую область и получили ряд ценных результатов.

В области атомной спектроскопии выдающееся значение имели работы Д. С. Рождественского, опубликованные еще в двадцатых годах. В этих работах на примере атома лития и других щелочных металлов было показано близкое сходство высших уровней этих одновалентных атомов с термами водородоподобных атомов. На этой основе была отчетливо сформулирована так называемая модель излучающего электрона. Далее, путем сравнения спектра ионизированного магния со спектром гелия был установлен так называемый «спектроскопический закон смещения», согласно которому спектр однократно ионизированного атома с атомным номером Z аналогичен спектру нейтрального атома с атомным номером $Z-1$ *).

Два обстоятельства следует отметить в связи с этими работами Д. С. Рождественского. Во-первых, хотя работы Рождественского были основаны целиком на теории атома Бора, модель оптического электрона и спектроскопический закон смещения полностью сохранили свое эвристическое значение и служат руководящей нитью для экспериментаторов-спектроскопистов до сих пор. Во-вторых, в историческом аспекте эти работы имели особое значение для советской физики. Они были сделаны в период блокады, в полном отрыве советских ученых от зарубежной науки. И хотя после снятия блокады стало известно, что те же результаты были получены Зоммерфельдом, Шрёдингером и другими западными учеными, тот факт, что молодая советская наука в полном отрыве от сложившихся зарубежных научных школ сумела поставить и разрешить важнейшие проблемы того времени, послужил для нас источником радости и веры в свои силы.

*) Д. С. Рождественский, Спектральный анализ и строение атомов. Речь на годовичном собрании Государственного оптического института в Петрограде 15 декабря 1919 г. Труды Государственного оптического института, т. 1, вып. 6, Петроград, Государственное издательство, 1920.

Важнейшим организационным результатом этих работ явилось создание вокруг Рождественского блестящей школы советских спектроскопистов (А. Н. Теренин, С. Э. Фриш, Е. Ф. Гросс, А. Н. Филиппов, В. К. Прокофьев, М. А. Вейнгеров и др.). Отметим вошедшие в обиход современной спектроскопии результаты работ этой школы.

Конечная цель спектроскопического исследования атома состоит в установлении системы термов, т. е. схемы его уровней энергии. Эта схема уровней может быть проверена прямым экспериментом путем возбуждения атома до определенного верхнего состояния и установления последующих переходов вниз. Самое возбуждение может быть осуществлено либо путем электронного удара, либо оптическим путем, если заставить атомы поглощать кванты строго определенной частоты. В двадцатых годах большой популярностью пользовался метод электронного удара, с таким успехом примененный в классических работах Дж. Франка и Г. Герца. Преимуществом этого метода является возможность непрерывного изменения энергии электронов, обстреливающих атом. Однако при всем значении первых работ в этом направлении последующие работы давали результаты довольно грубые в количественном отношении, а в качественном далеко не всегда допускали ясную интерпретацию. Гораздо более тонким является метод оптического возбуждения. Он был широко использован А. Н. Терениным в ряде его работ, посвященных резонансному излучению и флуоресценции паров металлов. Благодаря различным усовершенствованиям, внесенным А. Н. Терениным в экспериментальную технику, ему удалось детально исследовать схемы уровней и проследить переходы между различными уровнями целого ряда атомов — ртути, кадмия, таллия, висмута, свинца, цинка, а также изучить так называемое ступенчатое возбуждение, при котором уже возбужденный атом поглощает еще один квант энергии и переходит на более высокий уровень. В наши дни все эти представления в такой степени вошли «в плоть и кровь» физиков, что даже трудно себе представить, сколь велико было в свое время значение описанных работ, с предельной ясностью позволивших осознать поток новых идей, хлынувших в спектроскопию с развитием квантовой теории атома.

Важным результатом отмеченного цикла работ было открытие А. Н. Терениным и Л. Н. Добрецовым сверхтонкой структуры линий натрия и А. Н. Терениным и Е. Ф. Гроссом — сверхтонкой структуры линий ртути (независимо от советских исследователей сверхтонкая структура была открыта Шюлером в Германии). Принципиальное значение этого на первый взгляд весьма специального результата состоит в том, что путем изучения сверхтонкой структуры оказалось возможным установить такие свойства атомного ядра, как его спин и магнитный момент. До сравнительно недавнего времени этот оптический метод был и единственным путем для определения этих важных констант ядра. Обширные исследования сверхтонкой структуры атомных линий были произведены С. Э. Фришем.

От оптического возбуждения атомов естествен переход к изучению оптического возбуждения молекул. В этой области важное значение имеют исследования А. Н. Теренина и его сотрудников, выяснивших путем спектроскопического изучения возбужденных молекул механизм элементарного фотохимического акта. Здесь следует обратить внимание на то, что, хотя изучение фотохимических процессов имеет длительную историю, до развития современной спектроскопии с ее совершенными экспериментальными методами и ясными теоретическими предпосылками основная проблема механизма элементарного фотохимического акта даже не могла быть отчетливо физически сформулирована. Между тем речь идет в данном

случае о весьма конкретной физической проблеме механизма превращения энергии электронного возбуждения молекулы полностью или частично в колебательную энергию ядер с последующим распадом. При этом огромная чувствительность спектроскопической методики, неизмеримо превосходящая обычные химические методы анализа, не только позволяет тончайшим образом улавливать сам факт распада, но и дает возможность устанавливать состояние, в котором освобождаются продукты распада. В самом деле, когда один из продуктов распада освобождается в возбужденном состоянии, обломки молекул становятся видимыми по испускаемому ими свечению, спектральный состав которого указывает их энергетическое состояние. По выражению А. Н. Теренина спектроскопическая методика позволяет не только улавливать продукты распада *in statu nascendi*, но и, что еще важнее, *in statu luminescendi*, в частности, при концентрациях, недоступных каким-либо иным методам анализа. В этих работах была применена весьма совершенная техника: мощная десятикиловаттная разрядная водородная трубка давала интенсивнейшее излучение вплоть до крайнего ультрафиолетового, где энергия фотонов составляет 150—200 ккал, а для идентификации продуктов распада, кроме спектроскопического, применялись и другие тонкие методы.

Многочисленные работы по электронным спектрам молекул, оптической диссоциации и преддиссоциации были опубликованы В. Н. Кондратьевым. Им же открыто интересное и важное явление индуцированной преддиссоциации.

Явления молекулярной флуоресценции в растворах при комнатной температуре, а также свечение кристаллофосфоров с теоретической и практической точек зрения представляют большой интерес. И в этой области советскими физиками сделан весьма значительный вклад. В работах С. И. Вавилова, В. Л. Левшина и их сотрудников флуоресценция в растворах подвергалась всестороннему и тщательному изучению. Прежде всего, С. И. Вавилов изучил выход флуоресценции растворов красителей. При этом оказалось, что энергетический выход флуоресценции во многих случаях близок к 100%, а квантовый выход и длительность возбужденного состояния не зависят от возбуждающей длины волны. Эта закономерность, играющая важную роль в выяснении механизма флуоресценции сложных молекул, носит название закона Вавилова.

Открытое Ф. Вейгером в 1920 г. замечательное явление поляризации флуоресценции было подвергнуто С. И. Вавиловым и В. Л. Левшиным в ряде фундаментальных работ всестороннему исследованию. Интерес этого явления состоит в его несомненной связи со строением излучающих молекул и в его необычайной чувствительности ко всякого рода возмущающим влияниям на излучающую молекулу. Благодаря этому та или иная степень поляризации флуоресценции может служить тончайшим признаком молекулярных взаимодействий.

Особенно важной и интересной оказалась открытая С. И. Вавиловым резкая зависимость степени поляризации от возбуждающей длины волны, причем для некоторых длин волн поляризация флуоресценции даже меняет знак, т. е. становится отрицательной. Благодаря существованию этой зависимости открывается возможность установления новой характеристики свойств молекул, именно — спектров поляризации, знание которых позволяет делать заключения о строении флуоресцирующих молекул. Возможности, которые открывает знание спектров поляризации флуоресценции, продемонстрировал ученик С. И. Вавилова П. П. Феофилов, изучивший спектры поляризации большого числа сложных органических молекул и показавший, что открытая С. И. Вавиловым зависимость степени поляризации от возбуждающей длины волны выражает различие

пространственной ориентации осцилляторов, моделирующих различные полосы в спектрах поглощения молекул.

В работах С. И. Вавилова и его сотрудников (И. М. Франк, Б. Я. Свешников) детально изучены также явления тушения флуоресценции и дана полная феноменологическая теория этих явлений.

В. Л. Левшин обосновал обширным экспериментальным материалом закон «зеркальной симметрии» спектров флуоресценции и абсорбции, который имеет место для кривых, представленных в шкале частот. Ряд теоретических вопросов, относящихся к люминесценции сложных молекул, исследован Б. И. Степановым.

При исследовании флуоресценции паров Б. С. Непорент обнаружил явления возгорания люминесценции при добавлении посторонних газов к парам ароматических соединений, а также «гашение» поглощения при действии легких газов. На основании этих явлений разработан, по-видимому, наиболее тонкий из существующих метод детального исследования передачи энергии при столкновениях и самого механизма столкновения. Из других работ Непорента отметим исследование процессов преобразования колебательной энергии в сложных молекулах. В этих работах развиты новые представления о строении уровней и происхождении сплошных спектров таких молекул. Эти работы продолжаются Н. А. Борисевичем в Институте физики Белорусской Академии наук в Минске.

Отметим возникновение в самые последние годы двух новых центров, где ведутся исследования в области люминесценции и спектроскопии: Институт физики Белорусской Академии наук в Минске (А. Н. Севченко, Б. И. Степанов, М. А. Ельяшевич и их сотрудники) и Тартуский университет в Эстонии (Ф. Д. Клемент, М. А. Москвин), а также Лаборатория люминесценции Эстонской Академии наук (К. К. Ребане, Ч. Б. Лушник и др.).

Наряду с обычной флуоресценцией, характеризуемой длительностью свечения порядка 10^{-8} сек, органические вещества, в частности красители в «жестких» средах, например в твердых растворах в борной кислоте, в сахарных леденцах, а также многие органические соединения в замороженных растворах в органических растворителях, дают длительное свечение со временем жизни, измеряемым секундами. Это явление фосфоресценции органических соединений также изучалось советскими исследователями (С. И. Вавилов, Б. Я. Свешников). В частности, П. П. Дикун показал, что ароматические углеводороды обнаруживают в парах слабое длительное свечение с тем же спектром, что и в жестких средах, что указывало на чисто молекулярный характер свечения. После того как польский физик А. Яблонский дал правильное феноменологическое объяснение этого длительного свечения как результата существования метастабильного уровня, расположенного между нормальным и первым возбужденным уровнями, А. Н. Теренин и одновременно и независимо от него Гильберт Ньютон Льюис высказали гипотезу, согласно которой метастабильный уровень является триплетным. Напротив, нормальное состояние ароматических углеводородов и флуоресцирующих красителей является синглетным, так как число оптических электронов в этих молекулах четное и спины каждой пары электронов взаимно компенсируются. При возбуждении молекулы, в результате сложной цепи процессов, спины одной пары электронов располагаются параллельно и возникает триплетное состояние, переход из которого в нормальное синглетное строго запрещен. Но вследствие спин-орбитального взаимодействия запрет частично снимается и возникает длительно живущее возбужденное состояние, время жизни которого в отдельных случаях (например у трифенилена) достигает до 15 сек, вместо 10^{-7} —

10^{-8} сек, характерного для разрешенных синглет-синглетных переходов. Прямым следствием перехода в триплетное состояние является возникновение магнитного момента у молекулы, что и было показано в ряде работ зарубежных исследователей — сначала путем трудных прямых экспериментов (Г. Н. Льюис, М. Каша и М. Кальвин, Д. Эванс), а в последнее время, после ряда неудачных попыток, методом электронного парамагнитного резонанса (Кл. Хатчисон и Мэнгум, Ван-дер-Ваальс). В самое последнее время начало выясняться, что подобные длительно находящиеся в возбужденном состоянии «триплетные», или иначе «бирадикальные», молекулы, по-видимому, могут играть существенную роль в некоторых важнейших биологических процессах.

Заслуживает упоминания также ряд работ по экспериментальному определению длительности возбужденного состояния (длительность свечения) при люминесценции. Л. А. Тумерман, а впоследствии в более усовершенствованном виде А. М. Бонч-Бруевич построили флуорометры — установки, с помощью которых в последнем варианте может быть определена длительность свечения вплоть до 10^{-11} сек. Очень ценный прибор для исследования кинетики быстропротекающих процессов (люминесценция, фотопроводимость и др.), так называемый «тауметр», построили Н. А. Толстой и П. П. Феофилов. Разработанный вначале для времени 10^{-1} — 10^{-5} сек метод был распространен Н. А. Толстым на более короткие времена (до $2 \cdot 10^{-8}$ сек, ультра тауметр).

Люминесценция кристаллофосфоров также подвергалась многочисленным исследованиям со стороны советских физиков (В. В. Антонов-Романовский, В. Л. Левшин и др.). Отметим обширные и в высшей степени тщательные исследования закона затухания цинк-сульфидных фосфоров, выполненные советскими физиками. Результаты этих исследований, имеющих основное значение для суждения о механизме фосфоресценции, прочно вошли в обиход работающих в этой области экспериментаторов и теоретиков как наиболее надежный материал *). П. П. Феофиловым впервые начато систематическое исследование спектрально-люминесцентных характеристик монокристаллов с редкоземельными активаторами, причем обнаружена неизвестная ранее люминесценция ряда ионов (трехвалентные неодим и гольмий, иттербий, уран и др.). В этой связи найден ряд новых интересных и важных явлений.

Современная теория люминесценции кристаллофосфоров основана на зонной теории кристаллов. Эта теория, лежащая в основе современных представлений об электрических и оптических свойствах твердых тел, оказалась в высшей степени плодотворной для понимания механизма свечения кристаллофосфоров. В настоящее время она является необходимой рабочей картиной для теоретиков и экспериментаторов, занимающихся исследованиями и техническими применениями кристаллофосфоров. Ценность этой теории для интерпретации явлений люминесценций твердых тел была показана в ряде работ Д. И. Блохинцева, С. И. Печкара и др.

Отметим также близко примыкающие к только что рассмотренным работы по фотохимии кристаллов. В работах Т. П. Кравца и М. В. Савостьяновой, продолженных затем М. В. Савостьяновой, удалось показать, что процесс образования скрытого изображения в кристаллах бромистого серебра близок к явлениям окрашивания кристаллов под действием ультрафиолетовых и рентгеновских лучей. Этот результат, независимо найденный также Гильшем и Р. В. Полем и Гёттингене, послужил нача-

*) См., например: Н. М о т т и Р. Г е р н и, Электронные процессы в ионных кристаллах, гл. VI, М., Гостехиздат, 1950.

лом многочисленных важных работ по теории возникновения фотографического изображения.

Из последних работ отметим обнаруженные П. П. Феофиловым кооперативные явления в активированных кристаллах: кумуляции энергии возбуждения и явления кооперативной сенсibilизации люминесценции. Эти работы открывают новые пути подхода к изучению сенсibilизации различных фотофизических и фотохимических процессов (спектральная сенсibilизация фотографических эмульсий, фотосинтез в растениях и др.).

Экспериментальные и теоретические исследования в области люминесценции кристаллофосфоров, разработка технологии изготовления кристаллофосфоров, исследование условий свечения при газовом разряде помогли промышленности освоить изготовление экономических ламп «дневного света», получающих все более широкое распространение.

Успехи атомной спектроскопии создали прочную базу для развития качественного и количественного атомного спектрального анализа. Неизмеримо превосходящие по скорости обычные методы химического анализа, методы атомного спектрального анализа нашли широчайшие применения в металлургической и машиностроительной промышленности, в анализе руд и минералов и в ряде других областей. В настоящее время ни одно из этих производств не обходится без лаборатории спектрального анализа, а число анализов, выполняемых ежегодно при геологических работах, измеряется миллионами. Заслуга развития и внедрения различных методов спектрального анализа, содействия проектированию и построению всех видов современной спектральной аппаратуры и вспомогательных приборов спектрального анализа принадлежит как московской (Г. С. Ландсберг, С. Л. Мандельштам, Н. Н. Соболев, А. К. Русанов и др.), так и ленинградской (А. Н. Филиппов, В. К. Прокофьев, С. Э. Фриш и др.) школам физиков.

В последнее время наряду с методами атомного спектрального анализа все большее значение и распространение начинают приобретать методы молекулярного спектрального анализа (инфракрасные и ультрафиолетовые спектры поглощения, спектры комбинационного рассеяния, люминесцентный спектральный анализ). Для этих методов открывается новое обширное применение: медицина, биология, фармацевтическая промышленность, нефтяная промышленность и др. Заслуга разработки и внедрения соответствующих методов принадлежит В. М. Чулановскому.

Большие успехи были сделаны в области спектроскопии кристаллов — органических и неорганических (полупроводниковых), а также в спектроскопии индивидуальных сложных органических соединений. Пионерские работы в области спектроскопии молекулярных кристаллов при глубоком охлаждении (азотные, водородные и гелиевые температуры, т. е. 77° , 20° и $4,2^\circ$ К) принадлежат И. В. Обреимову и А. Ф. Прихотько. В интерпретации сложных явлений, наблюдаемых как в случае молекулярных кристаллов ароматических соединений, так и в полупроводниковых кристаллах (Cu_2O , CdS), решающую роль сыграло выдвинутое Я. И. Френкелем представление об особых квазичастицах — экситонах. Это представление оказалось необычайно гибким и плодотворным, и его роль в интерпретации различных оптических явлений в кристаллах все возрастает.

Представление об экситоне было выдвинуто Френкелем при изучении механизма превращения света в тепло в одноатомных твердых кристаллических изоляторах. В этом случае возникает существенное затруднение, состоящее в том, что упругие или гармонические осцилляторы твердого

тела неспособны воспринять квант энергии, накопленный в электронной оболочке возбужденного атома, так как этот квант по крайней мере в 100 раз превышает наибольший квант энергии тепловых осцилляторов кристалла. Выход из этого затруднения, согласно представлению Френкеля, дает тот факт, что возбуждение не может оставаться локализованным на отдельных молекулах: трансляционная симметрия кристалла приведет к тому, что правильные стационарные состояния кристалла образуют волновые пакеты, которые станут распространяться по кристаллу в виде волны возбуждения. Этой волне возбуждения сопоставляется движение нейтральной квазичастицы, которую Френкель назвал экситоном. Экситон путешествует по кристаллу до тех пор, пока не встретит какой-либо дефект или постороннюю частицу, которой и отдаст свою энергию, превращаемую в тепло.

Экситонный механизм поглощения был использован А. С. Давыдовым для интерпретации спектров молекулярных кристаллов ароматических углеводородов (бензол, нафталин, антрацен). В этом случае силы взаимодействия, действующие внутри молекулы, во много раз превосходят слабые ван-дер-ваальсовы силы, связывающие между собой молекулы в кристалле. Применяя к этому случаю модель экситона Френкеля, А. С. Давыдов показал, что в случае, когда в элементарной ячейке кристалла располагаются две молекулы в различных (т. е. трансляционно-неэквивалентных) положениях, в спектре поглощения чистого кристалла должен возникнуть дублет, компоненты которого поляризованы по направлениям осей элементарной ячейки кристалла. За этим расщеплением в мировой литературе утвердилось название «давыдовское расщепление».

Обширные экспериментальные и теоретические исследования, выполненные при низких температурах в поляризованном свете А. Ф. Прихотько и ее сотрудниками (В. Л. Броуде, М. С. Бродин, М. Т. Шпак и др.), в общем подтвердили теорию Давыдова. Эти исследования приобрели широкую известность во всем мире и дали начало важному направлению в спектроскопии кристаллического состояния.

Для интерпретации спектров полупроводниковых кристаллов (также при низких температурах), таких, как закись меди Cu_2O или сернистый кадмий (CdS), чрезвычайно плодотворной оказалась несколько отличная модель экситона, предложенная Ванье и Моттом. Согласно этому представлению экситон можно рассматривать как нейтральную пару, состоящую из электрона, расположенного на некотором «экситонном уровне» в запрещенной энергетической зоне, и «дырки», эквивалентной положительному заряду, равному по величине заряду электрона в валентной зоне, причем оба центра могут быть расположены на большом расстоянии друг от друга (по данным Е. Ф. Гросса это расстояние для высоких уровней возбуждения доходит до 2500 Å). Подобная нейтральная пара, связанная кулоновскими силами, представляет собой квазиводородоподобный атом, или, точнее, позитроний, перемещающийся по кристаллу. Ему соответствуют водородоподобные стационарные уровни, расположенные в запрещенной зоне. Переходы между этими уровнями должны давать водородоподобный спектр, т. е. спектр с частотами, подчиняющимися формуле, аналогичной бальмеровской, и примыкающими со стороны длинных волн к собственному спектру поглощения молекул кристалла. Такой своеобразный спектр был открыт и чрезвычайно детально исследован в отсутствие поля, а также в сильных магнитных и электрических полях Е. Ф. Гроссом и его сотрудниками (Б. П. Захарченя, Б. В. Новиков и др.). Это открытие произвело большое впечатление; первоначально оно оспаривалось, но затем получило полное признание, вместе с тем доставившее торжество френкелевской идее экситона.

Только что рассмотренные явления, объясняемые на основе теории экситонов, относятся, как это было подчеркнуто, к спектроскопии кристаллов, т. е. к расположенным в кристаллической решетке атомам, ионам или молекулам со свойствами симметрии, принадлежащими кристаллу, но не образующим его единицам. Значительные успехи в изучении и разнообразных применениях спектроскопии индивидуальных сложных органических соединений были сделаны благодаря открытию Э. В. Шпольским с сотрудниками (А. А. Ильина, Л. А. Климова, Т. Н. Болотникова и др.) так называемых квазилинейчатых спектров. Суть явления состоит в том, что благодаря изоляции молекул в соответственно подобранных нейтральных микрокристаллических матрицах, при глубоком охлаждении (азотные, водородные или гелиевые температуры), широкие полосы спектров поглощения и люминесценции расщепляются на сотни узких линий шириной от $10\text{--}15\text{ см}^{-1}$ в менее благоприятных случаях до величин менее 1 см^{-1} — в наиболее благоприятных. Частоты собственных колебаний молекул в основном состоянии, определенные путем вибрационного анализа спектров люминесценции этого типа, с высокой степенью точности оказались совпадающими с частотами, определенными из спектров комбинационного рассеяния, в тех случаях, когда последние были известны. Этот факт, а также слабая поляризация спектров в монокристаллической матрице (М. Т. Шпак) однозначно указывают на то, что эти спектры действительно принадлежат индивидуальным молекулам, замороженным в матрицах в виде «ориентированного газа». Отсутствие размывания линий сплошным спектром фоонов, согласно теории К. К. Ребане и Е. Д. Трифонова, объясняется тем, что линии возникают при «бесфононных» переходах, а сами спектры представляют собой оптический аналог эффекта Мёссбауэра. Благодаря простоте необходимых для получения спектров манипуляций и точности результатов, метод квазилинейчатых спектров получил широкое распространение в ряде лабораторий в СССР и за рубежом. При его помощи исследовано до настоящего времени около 200 органических молекул разнообразных типов и степени сложности — от простых ароматических углеводородов до таких больших и сложных молекул, как порфин — структурная основа хлорофилла и гемоглобина — и его производные — порфирины (А. Н. Севченко, К. Н. Соловьев, С. Ф. Шкирман, Т. Ф. Качура — Институт физики Белорусской Академии наук). Индивидуальность, аддитивность и высокая чувствительность спектров позволили разработать на их основе эффективные методы качественного и количественного анализа, нашедшие применения в анализе канцерогенных веществ (П. П. Дикун, Л. М. Шабад, А. Я. Хесина — Академия медицинских наук СССР), в идентификации ароматики нефтей и битумов, органических веществ минералов земной коры и метеоритов (А. А. Ильина, Т. А. Теплицкая, Р. И. Персонов и др.).

Молекулярное рассеяние света является областью, в которой советским физикам принадлежат важнейшие достижения. Напомним прежде всего, что сам факт существования молекулярного рассеяния долгое время подвергался сомнению. Потребовались работы таких выдающихся ученых, как лорд Рэлей, М. Смолуховский, А. Эйнштейн, чтобы выяснить те условия, при которых возможно молекулярное рассеяние света. Большую ясность в дискуссию этого трудного вопроса внесли тонкие работы Л. И. Мандельштама, выполненные до революции. В 1920 г. французскому физiku Кабанну впервые удалось воспроизвести голубизну неба в лаборатории, т. е. воспроизвести и детально исследовать истинное молекулярное рассеяние в газах. После этого, в 1927 г., Г. С. Ландсберг безупречно доказал существование молекулярного рассеяния в твердом теле — в кристаллическом кварце. Продолжая исследование этого явления,

Г. С. Ландсберг и Л. И. Мандельштам в 1928 г. открыли, что в спектре молекулярно рассеянного света наряду с несмещенными возбуждающими спектральными линиями наблюдаются также и линии, смещенные в красную и фиолетовую стороны. Открытие этого явления, которое в СССР обычно называют комбинационным рассеянием света, является одним из важнейших и наиболее плодотворных открытий в физике XX столетия. Оно послужило стимулом к огромному количеству работ (исчисляемому тысячами), выполненных во всех решительно странах. Основанный на комбинационном рассеянии метод экспериментального определения



Л. И. Мандельштам.

собственных частот колебаний молекул открыл огромные возможности для физики, физической химии, а также химии неорганической и органической.

Как известно, открытие комбинационного рассеяния почти одновременно с Ландсбергом и Мандельштамом и независимо от них было сделано в Индии Раманом и Кришнаном, которые опубликовали свое первое сообщение раньше советских ученых. Ввиду этого, по установившейся традиции, в зарубежной литературе само явление обычно называют эффектом Рамана. Однако это чисто техническое обстоятельство — срок опубликования — нисколько не умаляет заслуг советских физиков, которым принадлежит, помимо факта открытия нового явления, построение строгой теории его (Л. И. Мандельштам, М. А. Леонтович, Г. С. Ландсберг, И. Е. Тамм).

Тот факт, что молекулярное рассеяние света может быть связано с изменением длины волны, не был неожиданностью для советских ученых.

Рассматривая молекулярное рассеяние как интерференционное отражение света на дебаевских упругих тепловых волнах, Л. И. Мандельштам, а также Л. Бриллюэн независимо друг от друга показали еще в 1918 г., что при таком рассеянии в среде с показателем преломления n возбуждающая волна λ_0 должна испытать расщепление на две волны, смещенные относительно λ_0 на величину

$$\Delta\lambda = \pm 2\lambda_0 n \frac{v}{c} \sin \frac{\theta}{2},$$

где v — скорость звука в среде и θ — угол рассеяния. Ввиду присутствия множителя v/c смещение $\Delta\lambda$ на порядок величины меньше смещения в комбинационном рассеянии. Однако и этот более тонкий эффект был обнаружен экспериментально Е. Ф. Гроссом.

Большой интерес представляют также работы Е. Ф. Гросса, М. Ф. Вукса, И. Л. Фабелинского и их сотрудников, посвященные исследованию так называемых «крыльев» рэлеевского рассеяния. Эти исследования позволили изучить процессы меняющихся со временем флуктуаций анизотропии, связанные с поворотной диффузией и вибрациями молекул. В последнее время Фабелинский и его сотрудники открыли новое нелинейное оптическое явление, названное вынужденным рассеянием крыла линии Рэля (см. стр. 250).

М. А. Ельяшевич и Б. И. Степанов развили теорию колебаний молекул и дали методы расчета частот и формы колебаний. М. В. Волькенштейн разработал теорию интенсивностей в колебательных спектрах (инфракрасных и спектрах комбинационного рассеяния), объяснившую установленные эмпирически закономерности в колебательных спектрах. Эти работы М. В. Волькенштейна, М. А. Ельяшевича и Б. И. Степанова суммированы в их двухтомной монографии «Колебания молекул».

Одно из важнейших открытий в области оптики было сделано в 1934 г. П. А. Черенковым и С. И. Вавиловым. Уже при первых наблюдениях свойств радиоактивных веществ супругами Кюри было обнаружено, что растворы некоторых минеральных солей под действием радиоактивных веществ испускают слабое свечение. Это свечение рассматривалось обычно как флуоресценция.

Однако П. А. Черенков показал в 1934 г., что под действием γ -лучей не только растворы (как, например, растворы ураниловых солей, флуоресценцию которых изучал Черенков), но и чистые жидкости, как, например, дистиллированная вода, ксилол, толуол, глицерин, различные спирты, дают слабое свечение. По своим свойствам это свечение явно отличалось от флуоресценции: оно не испытывало тушения под действием наиболее сильных «гасителей» флуоресценции (раствор КJ и др.), его поляризация была существенно отлична от поляризации флуоресценции. С. И. Вавилов, руководивший работой Черенкова, правильно усмотрел в этом свечении новый эффект, который он связал не с самими γ -лучами, а со свободными электронами, освобождаемыми в среде γ -лучами.

Полная количественная теория излучения Вавилова — Черенкова (в литературе она чаще называется «излучением Черенкова») была дана И. М. Франком и И. Е. Таммом (позднее в более строгом виде — И. Е. Таммом) и во всех деталях подтверждена экспериментально П. А. Черенковым. Франк и Тамм объяснили происхождение этого излучения с точки зрения классической электромагнитной теории как волну, сопровождающую электрон, равномерно движущийся со скоростью, большей фазовой скорости света в данной среде, т. е. большей c/n (n — показатель преломления среды). Простое условие когерентности элементарных гюйгенсовых волн,

возникающих при движении электрона в среде со скоростью $\beta = \frac{v}{c}$, есть

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n},$$

где θ — угол, образуемый нормалью к фронту волны с направлением движения. Из этого следует, что электрон, движущийся со скоростью $v > c/n$, должен сопровождаться V-образной волной, наглядным аналогом которой может служить ударная волна в воздухе, сопровождающая полет



Г. С. Ландсберг.

снаряда со скоростью, большей скорости звука в воздухе, или носовая волна, сопровождающая движение корабля, когда его скорость превышает скорость волн на поверхности воды.

В. Л. Гинзбург дал квантовую трактовку эффекта Вавилова — Черенкова, применяя к испусканию фотона движущейся частицей законы сохранения энергии и импульса. Далее Гинзбург показал, что излучение Черенкова должно наблюдаться, когда заряженная частица движется вблизи поверхности диэлектрика параллельно ей. При этом Гинзбург показал, что таким путем можно создать источник микроволнового электромагнитного излучения таких длин волн, которые трудно получать иным способом.

В последнее время на основе эффекта Черенкова были построены счетчики быстрых частиц, получившие чрезвычайно широкое распространение в ядерных исследованиях. Такой счетчик состоит просто из чистой жидкости (например, воды) или цилиндра из плексигласа и фотоумножителя, регистрирующего вспышку излучения.

Излучение Черенкова и все связанные с ним эффекты наблюдаются, когда заряд движется в среде со сверхсветовой скоростью. В. Л. Гинзбург и И. М. Франк указали, однако, что должно существовать так называемое «переходное излучение», состоящее в том, что при пересечении раздела двух сред равномерно движущийся заряд должен излучать электромагнитные волны при любой его скорости. Этот эффект был рассчитан Гинзбургом и Франком, а недавно он был обнаружен на опыте.

Отметим, наконец, два принципиально важных эксперимента, наглядно обнаруживающих квантовую природу света. Первый эксперимент, выполненный А. Ф. Иоффе и Н. И. Добронравовым, обнаружил флуктуации «попадания» фотонов очень слабого рентгеновского излучения в ультрамикроскопическую заряженную висмутовую пылинку, подвешенную в милликоновском конденсаторе.

Второй эксперимент, выполненный С. И. Вавиловым с сотрудниками (Е. М. Брумберг, З. М. Сverdlov), обнаружил статистические флуктуации числа фотонов видимого света, попадающих в глаз при предельно слабых интенсивностях (адаптированный на темноту глаз был выбран детектором ввиду его необычайной чувствительности).

Обзор работ по физической оптике мы закончим работами, посвященными крайним областям спектра. Оптическая природа рентгеновских лучей была установлена открытием интерференции рентгеновских лучей в кристаллах. Однако классические интерференционные и дифракционные опыты с рентгеновскими лучами трудно осуществимы вследствие малой длины их волны. Несмотря на эту трудность, В. П. Линнику удалось осуществить с рентгеновскими лучами интерференционный опыт Ллойда, являющийся видоизменением опыта Френеля с двумя зеркалами, и по расстоянию интерференционных полос непосредственно определить длину волны рентгеновских лучей.

Область спектра, лежащая по другую сторону видимой части, а именно участок спектра между длинными инфракрасными и короткими электромагнитными волнами, была открыта благодаря работам А. А. Глаголевой-Аркадьевой и М. А. Левитской (двадцатые годы), выполненным совершенно независимо друг от друга. Благодаря остроумному методу возбуждения лучей, лежащих в этой области, при помощи так называемого «массового излучателя» удалось обнаружить их с полной ясностью и таким образом заполнить последний пробел в единой шкале электромагнитных волн задолго до развития современных методов.

К в а н т о в а я э л е к т р о н и к а

С 1951 г. А. М. Прохоровым были развернуты в СССР исследования по радиоспектроскопии, т. е. исследования поведения молекул в электромагнитных полях радиочастотного диапазона. Вскоре после этого Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым была выдвинута идея создания молекулярного генератора электромагнитных колебаний сверхвысоких частот, который основан на индуцированном излучении молекул, т. е. на излучении возбужденных атомов или молекул под действием поля излучения; существование такого излучения, наряду со спонтанным, было предсказано еще в 1918 г. А. Эйнштейном. Но для реализации идеи создания молекулярного генератора потребовалось три года упорной работы. В 1954 г. молекулярный генератор был осуществлен в США Ч. Таунсом и сотрудниками, а спустя несколько месяцев — в СССР Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым.

Создание молекулярного генератора ознаменовало рождение новой области физики — квантовой электроники, стоящей на стыке между

радиофизикой и оптикой. Эта область бурно развивается и в настоящее время, причем ведущую роль в этом развитии играют советские физики; это и отмечено присуждением Нобелевской премии Н. Г. Басову и А. М. Прохорову совместно с Ч. Таунсом.

Принцип работы молекулярного генератора заключается в предварительном создании пучка молекул, находящихся на верхнем энергетическом уровне, и последующем индуцированном «высвечивании» молекул в поле электромагнитных колебаний резонатора. Пучок возбужденных молекул, таким образом, приводит к отрицательному поглощению (индуцированное испускание) электромагнитной энергии в резонаторе, из-за чего и происходит самовозбуждение колебаний.

Отметим, что экспериментальное осуществление отрицательного поглощения в оптической области, независимое от работ по квантовой электронике, было выполнено В. А. Фабрикантом и Ф. А. Бутаевой, которые при помощи остроумного экспериментального приема отчетливо наблюдали отрицательное поглощение на ртутных линиях 5461, 4358 и 4047 *).

Молекулярный генератор излучает волны с частотой колебаний молекул. Поскольку внешние условия чрезвычайно слабо влияют на параметры молекулы, такой генератор обладает очень высокой стабильностью частоты, что обеспечило ему использование в качестве эталона времени. Большую роль в изучении физики молекулярных генераторов и создании различных их схем сыграли А. И. Ораевский, М. Е. Жаботинский и Г. М. Страховский.

На первом этапе развития квантовой электроники пучки молекул, находящихся на верхнем энергетическом уровне, создавались в сортирующем устройстве, основанном на штарк-эффекте. Молекулы, входя в резонатор, высвечивались в нем и после этого выводились из резонатора.

В 1956 г. Н. Г. Басов и А. М. Прохоров предложили новый метод получения перенаселенности верхних уровней, метод трех уровней, который позволил использовать для создания отрицательного поглощения одни и те же молекулы. Используя этот метод, Н. Бломберген (США) предложил усилитель СВЧ колебаний, основанный на переходах в ионах парамагнитных кристаллов. Изменением напряженности магнитного поля легко достигается изменение частоты переходов. Парамагнитные квантовые усилители обладают рекордно низкими собственными шумами. Это свойство обусловило их использование в сверхчувствительной приемной радиоаппаратуре, например в радиотелескопах.

В конце шестидесятых годов выявились возможности реализации квантового генератора оптического диапазона — лазера. Н. Г. Басов, Б. М. Вул, Ю. М. Попов и О. Н. Крохин предложили методы создания перенаселенности высших энергетических состояний в полупроводниках и построения на их основе полупроводниковых квантовых генераторов. Ч. Таунс и А. Шавлов (США) проанализировали проблему создания оптических квантовых генераторов в целом. Вслед за этими работами в 1960—1961 гг. были реализованы оптические квантовые генераторы различных видов, использующие переходы примесных центров в кристаллах, в стекле (так называемые твердотельные квантовые генераторы), газовые квантовые генераторы и полупроводниковые генераторы.

Особенно успешно в СССР развивались полупроводниковые лазеры. Было предложено несколько методов возбуждения полупроводни-

*) См., например: В. А. Ф а б р и к а н т и Ф. А. Б у т а е в а в сборнике статей памяти Г. С. Ландсберга. М., 1959.

ков, часть из которых была впервые реализована в Физическом институте АН СССР им. П. Н. Лебедева О. В. Богданкевичем, А. З. Грасюком и др.

Большие успехи в разработке и изучении лазеров на стекле с примесями неодама были достигнуты А. М. Бонч-Бруевичем, М. П. Ванюковым и П. П. Феофиловым. Новый мощный лазер в инфракрасном диапазоне был создан А. М. Прохоровым и Т. М. Муриной.

Значительным достижением самого последнего времени является запуск лазеров с оптической накачкой на растворах красителей. Такие лазеры обладают достаточно высокой мощностью и могут быть реализованы во многих областях оптического спектра. В СССР ряд важных теоретических и экспериментальных работ в этом направлении выполнен Б. И. Степановым и сотрудниками.

Создание лазеров вызвало новое бурное развитие оптики. Не секрет, что в течение некоторого времени перед появлением лазеров среди ученых существовало мнение, что оптика как отдел физики уже сыграла свою роль и сохранила значение только как прикладная дисциплина. Эта точка зрения была полностью опровергнута, когда, благодаря возможности использовать высокоинтенсивное излучение лазеров, открылось совершенно неожиданно новое поле для исследования оптических явлений. Сюда относится оптика высокоинтенсивного излучения, или нелинейная оптика. Более сорока лет назад С. И. Вавилов совместно с В. Л. Левшиным в опытах с высокой (по тому времени) интенсивностью света наблюдали уменьшение коэффициента поглощения уранового стекла на 1,5% при средней погрешности $\pm 0,3\%$. Явление было истолковано как результат нарушения линейности уравнений оптики при взаимодействии излучения с веществом. Позднее, в 1944 г., С. И. Вавилов подчеркивал, что реальная оптика вещества, с которым мы имеем дело, в общих случаях «несомненно нелинейна» *).

В случае уранила сравнительная легкость обнаружения нелинейности обусловлена большой длительностью возбужденного состояния ($\tau \sim 10^{-4}$ сек) и связанной с этим возможностью накопления активных центров на возбужденном уровне. Но при рассеянии света, например, осуществление нелинейной деформации поляризуемости атомов и молекул возможно лишь при условии, чтобы напряженность электрического поля световой волны была порядка напряженности атомных электрических полей ($\sim 10^8$ в/см). Такие поля создаются лишь при освещении монохроматическим излучением лазеров. Первым нелинейным эффектом, осуществленным с помощью лазеров, было удвоение частоты. Первоначально наблюдаемый эффект был очень мал, но вскоре были найдены возможности существенного увеличения к. п. д. преобразования, и на этой основе были созданы эффективные удвоители частоты света. Такие умножители позволяют получать полное излучение в области спектра, где нет лазеров, в том числе и в ультрафиолете. Подобное излучение может быть использовано в физике и в технике. В этой связи необходимо отметить работы С. А. Ахманова и Р. В. Хохлова, которым принадлежит также первая монография по нелинейной оптике **).

Эффекты рассеяния — комбинационного, Мандельштама — Бриллюэна и «гроссовского» — при высокой интенсивности падающего излучения приобретают новые черты — рассеяние становится индуцированным, в отличие от спонтанного, имеющего место при малых уровнях падающего излучения. Отметим в этой связи работы И. Л. Фабелинского. В част-

*) См. также: С. И. Вавилов, Микроструктура света. М., 1950.

**) С. А. Ахманов и Р. В. Хохлов, Проблемы нелинейной оптики. М., 1964.

ности, ему принадлежит открытие так называемого вынужденного рассеяния крыла линии Рэлея. Явление заключается в том, что при большой интенсивности возбуждающего света возникает значительная по величине сила, ориентирующая анизотропные молекулы среды, что вызывает меняющуюся во времени анизотропию, модулирующую свет.

В 1962 г. С. А. Ахманов и Р. В. Хохлов предложили так называемый параметрический генератор света, который является в сущности преобразователем излучения лазера, работающего на фиксированной длине волны (твердотельного или газового), в излучение с плавно перестраиваемой выходной частотой. Такие генераторы недавно были созданы в СССР и США. Использование этих генераторов существенно расширяет сферу использования лазеров.

Действительно, созданные в настоящее время параметрические генераторы позволяют плавно перекрывать диапазон 50% от средней длины волны, причем ширина линии генерируемых колебаний составляет доли ангстрема, а мощности достигают сотен киловатт.

Использование таких генераторов в экспериментальной спектроскопии способно революционизировать эту область, существенно повысить точность и чувствительность спектрального анализа (в частности, абсорбционной спектроскопии). Значительно расширяются и возможности самой нелинейной оптики; параметрические генераторы позволяют осуществлять резонансное взаимодействие высокоинтенсивного когерентного излучения с любой молекулярной системой.

Весьма интересным нелинейным эффектом в оптике является эффект самофокусировки мощных световых пучков, впервые предложенный Г. А. Аскарьяном. Этот эффект основан на зависимости показателя преломления среды от интенсивности излучения.

Таким образом, области, занятые излучением, оказываются оптически более плотными, что из-за нелинейной рефракции приводит к самофокусировке пучков. Явление самофокусировки играет большую роль в нелинейной оптике, изменяя, в частности, пороги вынужденных рассеяний и т. п.

Важный цикл работ по многофотонным процессам выполнен Л. В. Келдышем, развившим последовательную теорию явления, и Н. Г. Делоне и Г. В. Вороновым, выполнившими интересный эксперимент по многофотонной ионизации газов.

Большой интерес представляют работы П. П. Феофилова, посвященные выявлению нового механизма резонансного многофотонного поглощения. До последнего времени видимое свечение, вызываемое в кристаллах с редкоземельными ионами инфракрасным излучением, трактовалось как результат последовательного поглощения двух или трех фотонов и испускания одного фотона с двойной или тройной частотой. Проведенные исследования показали, что такой механизм неверен. П. П. Феофилов предложил новый механизм, заключающийся в однократном поглощении активаторными центрами инфракрасных квантов, в последующем взаимодействии возбужденных центров с перераспределением их энергии, с кумуляцией энергий нескольких центров на одном и, наконец, — с его высвечиванием с испусканием кванта удвоенной или утроенной частоты.

Создание оптических квантовых генераторов является одним из главных успехов физики за последнее десятилетие. Специфические свойства излучения таких генераторов — высокая когерентность, направленность, большая мощность и т. п. — легли в основу ряда новых областей физики и техники, в первую очередь нелинейной оптики, техники связи и т. д.

Радиофизика и теория колебаний

История развития радиофизики в СССР во многом напоминает историю развития оптики. И та и другая являются дисциплинами, имеющими важнейшие применения для обороны и культуры страны; вопреки своей важности эти дисциплины в дореволюционной России находились на низком уровне развития.

Правда, в начале XX столетия еще и не существовало радиотехники как отдельной технической науки, не существовало даже и терминов «радиофизика» и «радиотехника». Отдел физики, носивший название «Электромагнитные колебания и волны», с практическими применениями в виде «беспроволочной телеграфии», был еще очень молодым. Тем не менее отставание в этой области дореволюционной России — страны, где А. С. Попов изобрел «беспроволочную связь», — было очевидно. Перед первой мировой войной в России не существовало ни специальных лабораторий, ни кафедр высших учебных заведений, где бы разрабатывались проблемы радиофизики, и не существовало своей национальной промышленности для «беспроволочной телеграфии». Как раз это последнее обстоятельство, связанное с зависимостью промышленности от иностранного капитала, и тормозило развитие радиофизики в России.

Некоторое оживление работ в области радиофизики возникло уже во время первой мировой войны (1914—1918) благодаря деятельности М. В. Шулейкина, Н. Д. Папалекси и их сотрудников. Но, как и в области оптики, интенсивное развитие радиофизики и радиотехники началось после Октябрьской революции. Большую роль на первом этапе этого развития сыграла «Нижегородская радиолaborатория», основанная по личному указанию В. И. Ленина в Нижнем Новгороде (ныне — Горьком) под научным руководством М. А. Бонч-Бруевича. Следует с благодарностью вспомнить также деятельность В. К. Лебединского, который принадлежал к группе основателей Нижегородской лаборатории и сыграл большую роль не столько своей творческой, сколько организационной, педагогической и литературной деятельностью. Вместе с тем приблизительно в то же время возникает ряд радиофизических и радиотехнических центров в других городах, главным образом на вновь создаваемых кафедрах высших учебных заведений. Такова была кафедра М. В. Шулейкина в Москве в тогдашнем МВТУ (в настоящее время МВТУ имени Баумана), кафедра Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси в Одессе, радиолaborатория, организованная А. А. Чернышевым в Ленинградском политехническом институте.

В области теории колебаний, значение которой для физики и техники далеко выходит за пределы одной только радиотехники, были достигнуты столь значительные успехи, что полученные в этой области результаты можно с полным правом отнести к числу наиболее ярких достижений советской физики за истекшие 50 лет. Выдающуюся роль в этих достижениях сыграли работы Л. И. Мандельштама, Н. Д. Папалекси и их обширной школы. Отметим также, что эти достижения явились плодом тесного сотрудничества физиков, математиков и инженеров.

Как известно, классической теорией колебаний была прежде всего теория линейных колебаний, т. е. колебаний, подчиняющихся весьма простому, широко известному линейному дифференциальному уравнению. Несмотря на большую законченность этой классической теории, школе Мандельштама и Папалекси мы обязаны существенным подъемом научного уровня и в этой области. Этот подъем проявился в таких, например, вопросах, как обобщение и углубление, казалось бы, столь знакомого всем понятия, как понятие резонанса. Что понятие резонанса должно быть обобщено, видно из элементарного механического примера маятника.

который может быть сильно раскачан либо привычным способом под действием периодической внешней силы, т. е. периодическим «подталкиванием» с периодом, равным собственному периоду маятника, либо путем периодического изменения длины маятника. Последний прием, который осуществляется также при раскачивании качелей, когда периодически изменяется высота центра тяжести качелей над землей, представляет собой наглядный пример так называемого параметрического резонанса, так как



Н. Д. Папалекси.

резонанс здесь достигается периодическим изменением параметров, какими являются длина и момент инерции качелей.

Другим примером параметрического резонанса может служить возбуждение колебаний в электрических колебательных системах путем периодического изменения емкости или индуктивности системы (без внешней э. д. с.). Этот случай особенно интересен потому, что углубленный анализ его, выполненный Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси, привел их к открытию нового способа генерации переменных токов, осуществленного в построенных ими так называемых параметрических машинах.

Интерес к параметрически возбуждаемым колебательным системам сильно возрос в последнее время в связи с появлением малолитражных параметрических усилителей, а также быстродействующих элементов вычислительных машин — параметронов. Отметим существенную роль в изучении параметрических усилителей, которую сыграли работы группы Н. Н. Малова (В. С. Эткин, Е. М. Гершензон и др.). В работах этих авторов впервые показана возможность электронной перестройки парамет-

рических усилителей, изучены вопросы повышения их чувствительности и расширения полосы пропускания и исследованы многочастотные параметрические системы с одним или несколькими переменными параметрами.

В СССР было предложено несколько новых применений параметрических устройств: двухконтурные генераторы с диапазонной стабилизацией частоты (С. А. Ахманов, Г. М. Уткин), делители частоты высокой кратности (А. Е. Каплан) и т. д.

Лет пятьдесят назад классическая теория линейных колебаний практически удовлетворяла все запросы физики и техники. Но с появлением такого важнейшего физического и технического устройства, каким является электронная лампа, действие которой в генераторах незатухающих колебаний, а также в качестве детектора целиком основано на ее нелинейности, выдвинулась первостепенной важности задача разработки теории нелинейных колебаний.

Заслуга первоначального развития теории нелинейных колебаний принадлежит Ван-дер-Полю, создавшему научный центр по этим вопросам в Голландии. Однако в сороковых годах, благодаря работам школы Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси (А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин, Г. С. Горелик, С. М. Рытов, С. П. Стрелков и др.), а также Н. М. Крылова, Н. Н. Боголюбова и Ю. Б. Кобзарева, центр тяжести работ в области нелинейных колебаний переместился из Голландии в СССР.

Развитые в результате всех этих исследований эффективные методы получили многочисленные применения, первоначально главным образом в области радиофизики, а затем и в целом ряде других областей, далеко отстоящих от радиофизики. Так, например, уже после Великой Отечественной войны теория нелинейных колебаний была распространена А. А. Андроновым и его школой (М. А. Айзерман, Ю. М. Неймарк, М. А. Железцов и др.) на проблемы автоматического регулирования, в частности регулирования хода машин; с помощью той же теории были получены новые результаты в теории часов, теории действия автопилота. Эти же методы были с успехом применены к теории действия ускорителей заряженных частиц и к астрофизической проблеме звезд-цефеид, периодически меняющих свой блеск (С. А. Жевакин). Более детальная характеристика всей этой области, столь же важной, сколько и интересной, далеко выходит за рамки настоящего общего очерка развития советской физики. Интересующиеся найдут ряд блестящих статей и лекций в собраниях сочинений Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси. Обширная монография по теории нелинейных колебаний, переведенная на иностранные языки и ставшая классической, написана А. А. Андроновым, А. А. Виттом и С. Э. Хайкиным.

Развитие радиотехники и радиофизики шло по пути укорочения длины волны применяемого излучения и освоения все более и более коротковолновых диапазонов. Уже в первые послевоенные годы длина волны излучения стала измеряться дециметрами и сантиметрами и стала сравнимой с линейными размерами приемной и передающей аппаратуры. Нелинейные процессы, лежащие в основе действия этой аппаратуры, перестали быть колебательными и приобрели волновой характер. Это создало предпосылки для развития нелинейной теории волн, в построении которой советские радиофизики приняли самое деятельное участие.

В отличие от теории колебаний, опирающейся на обыкновенные дифференциальные уравнения, теория волн базируется на уравнениях в частных производных, нелинейная теория которых была практически не разработана. Поэтому для анализа нелинейных волновых процессов необходимо было создать математический аппарат, а также установить на его

основе качественные представления и закономерности протекания таких процессов. Важные результаты в этой области были получены А. В. Гапоновым, Р. В. Хохловым и их сотрудниками. На базе этих работ развились такие новые направления, как учение об ударных электромагнитных волнах, нелинейная оптика, получила дальнейшее развитие нелинейная акустика и пр.

Другая область радиофизики, в которой весьма успешно работали советские физики, — важнейшая для всех видов радиопередач область



А. А. Андронов.

теории распространения электромагнитных волн. Как известно, распространение радиоволн, создающее возможность радиосвязи на больших и малых расстояниях, с точки зрения физики обусловлено двумя явлениями — дифракцией и рефракцией, — относительная роль которых существенно зависит от расстояния или, точнее, от отношения расстояния к длине волны. Вместе с тем особенностью распространения волн в радиодиапазоне является, в отличие от оптики, близость излучения (в масштабе длины волны) к границе раздела, например границе земля — воздух. Из-за этого математическая задача о распространении радиоволн настолько сложна, что ее решение потребовало усилий со стороны таких выдающихся представителей математической физики, как А. Зоммерфельд в Германии и В. А. Фок в СССР. В окончательном виде работа В. А. Фока была опубликована в 1933 г. Ряд других проблем, например задача о так называемой береговой рефракции, был решен в работах М. А. Леонтовича, Г. А. Гринберга и Е. Л. Фейнберга.

В дальнейшем Е. Л. Фейнберг развил общую теорию распространения радиоволн вдоль неоднородной и шероховатой поверхности.

В последние годы значительное развитие получила теория дифракции. Это связано с задачами антенной и волноводной техники, а также — оптических квантовых генераторов. Были разработаны новые методы анализа дифракционных задач, в частности метод параболического уравнения (М. А. Леонтович и В. А. Фок) и метод факторизации (Л. А. Вайнштейн), и выявлены новые системы, нашедшие применение в технике. Так, А. М. Прохоровым были предложены открытые резонаторы для лазеров, Б. З. Каценеленбаумом и В. М. Талановым предложены открытые волноводы для передачи энергии в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне и т. д.

При исследованиях распространения радиоволн обычно интересовались исключительно амплитудой электромагнитных волн. Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси открыли новую область для плодотворных исследований, сосредоточив внимание на распространении фазы колебаний. В результате глубокого анализа особенностей интерференции радиоволн по сравнению с интерференцией в оптике они показали, как с помощью интерференции радиоволн можно измерять скорость распространения или расстояние при известной скорости распространения. В практическом осуществлении метод был использован ими и их сотрудниками и для измерения расстояний, и для измерения скорости распространения. Для измерения расстояний Мандельштамом, Папалекси был построен специальный прибор радиодальномер, с помощью которого расстояния порядка 100 км измеряются за 4—5 мин. с точностью до сотых процента. Этот и другие приборы, основанные на радиоинтерференции, получили применение в морской навигации и при геодезических съемках. Скорость распространения электромагнитных волн измерялась в ряде экспедиций, причем в измерениях на Черном море результаты были получены с погрешностью в 2—3 десятых процента. Эти измерения показали, что скорость распространения электромагнитных волн над морем равна скорости света.

Рассмотренными работами далеко не исчерпываются исследования распространения радиоволн, выполненные в СССР. Укажем работы по изучению законов распространения волн метрового диапазона, выполненные Б. А. Введенским с сотрудниками. Теория дифракционного распространения радиоволн развита В. А. Фоком. Ряд других ценных экспериментальных и теоретических работ М. А. Бонч-Бруевича, А. Н. Шукина и др. по распространению радиоволн выходит за рамки настоящего обзора. Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси еще в годы Великой Отечественной войны обратили внимание на интересные возможности использования радио в астрономии (радиолокация Луны). В дальнейшем по инициативе Н. Д. Папалекси были произведены теоретические расчеты коэффициентов отражения радиоволн от солнечной короны и выяснено, что должно иметь место интенсивное радиоизлучение Солнца (В. Л. Гинзбург). Теория получила подтверждение во время солнечного затмения в состоявшейся летом 1947 г. под руководством С. Э. Хайкина экспедиции в Бразилию. С этого времени началось развитие радиоастрономии в СССР. К настоящему времени оно уже дало много важных результатов, как теоретических (В. Л. Гинзбург, И. С. Шкловский, Г. Г. Гетманцев, И. М. Гордон, В. В. Железняков, Н. С. Кардашев, С. И. Сыроватский), так и экспериментальных (В. В. Виткевич, В. С. Троицкий, Ю. Н. Парийский, А. Е. Саламонович, В. А. Разин, А. Д. Кузьмин). Укажем, например, на исследование В. В. Виткевичем солнечной «сверхкороны» — электронов неоднородностей, простирающихся на огромные (порядка 15 солнечных радиусов и больше) расстояния от Солнца. Группа под руководством

В. А. Котельникова осуществила радиолокацию ряда планет; отметим также исследование В. С. Троицким свойств верхнего покрова Луны, выполненное с помощью чисто радиофизических методов. Мы ограничиваемся этим кратким упоминанием о радиоастрономических работах, так как теперь они уже в большей степени относятся к астрофизике.

Уже с первых шагов разработки теории нелинейных колебаний в СССР Л. И. Мандельштам и А. А. Андронов обратили внимание не только на динамическое описание колебательных систем, но и на статистическое, учитывающее наличие случайных (флуктуационных) процессов. Дальнейшие исследования роли флуктуаций в ламповом генераторе позволили не только теоретически оценить его принципиальную немонохроматичность, но и измерить эту «естественную» спектральную ширину линии генератора, несмотря на ее чрезвычайную малость (в относительной мере — порядка 10^{-13}). Это было сделано И. Л. Берштейном, а стало возможным благодаря предложенному им очень остроумному радиофизическому методу измерения весьма малых разностей фаз (до сотых долей угловой секунды). Г. С. Горелик предложил и осуществил затем ряд исключительно интересных применений указанного фазометрического метода, имеющих большое самостоятельное значение. Сюда относятся повторение вихревого опыта Саньяка в радиодиапазоне, применение модуляционного метода в оптической интерферометрии, измерение весьма малых сравнительно с длиной световой волны амплитуд механических колебаний (порядка сотых долей ангстрема), измерение угловых диаметров звезд и др.

Дальнейшее развитие получили и теоретические работы по статистическим явлениям в автоколебательных системах и в иных нелинейных устройствах.

Н и з к и е т е м п е р а т у р ы

Исследования в этой области выполнялись в трех крупных центрах: в Институте физических проблем в Москве под руководством П. Л. Капицы и в криогенной лаборатории Физико-технического института АН УССР в Харькове, а в самое последнее время — в недавно созданном Физико-техническом институте низких температур в Харькове (В. И. Веркин).

Работы П. Л. Капицы представляют собой прежде всего крупный шаг вперед в деле создания нового типа машин для сжижения газов в техническом масштабе. Следует напомнить, что вообще существуют два метода охлаждения и сжижения газов. В первом — охлаждение обусловлено совершением внутренней работы (эффект Джоуля — Томсона). Этот метод используется в широко распространенных и описанных во всех учебниках машинах Линде. Во втором — газ охлаждается при адиабатическом расширении, причем это охлаждение достигается за счет совершения газом внешней работы. Такое охлаждение наблюдалось еще в 1819 г. Клеманом и Дезормом при адиабатическом расширении газа, когда давление в сосуде понижалось при выпуске части газа через кран. Можно показать, что при таком расширении остающийся в сосуде газ сообщает определенную кинетическую энергию уходящему газу и адиабатически охлаждается. Явление это хорошо известно каждому, выполнявшему в физическом практикуме работу по определению отношения теплоемкостей газа по методу Клемана и Дезорма. Оно использовалось иногда в лабораторных экспериментах по охлаждению и сжижению газов: Ольшевский, 1895 г. — сжижение водорода, Симон, 1933 г. — сжижение гелия, а в промышленном масштабе — для сжижения воздуха — было разработано и осуществлено Ж. Клодом во Франции. Построение основанной на этом принципе технически оформленной машины для непрерывного сжижения гелия встретило, однако, большие затруднения, которые

были впервые преодолены Капицей в построенном им в 1934 г. гелиевом ожижителе.

После этого основанные на адиабатическом охлаждении гелиевые ожижители получили широкое распространение у нас и за рубежом. В настоящее время в Институте физических проблем работает мощный ожижитель, дающий 100 л жидкого гелия в час.

Тот же принцип охлаждения за счет совершаемой газом внешней работы при адиабатическом расширении был использован П. Л. Капицей в машине нового типа для промышленного получения жидкого воздуха. В этой машине газ совершал внешнюю работу, приводя во вращение высокоэффективную турбину (турбодетандер). Эта экспериментальная турбина имела диаметр всего 8 см, весила только 250 г, но работала при 40 000 оборотов в минуту. На основе этой турбины Капица разработал и построил экспериментальную установку для получения жидкого воздуха. В этой машине воздух предварительно сжимается всего до 4—5 атмосфер, в то время как в принятых в промышленности установках, где охлаждение достигается за счет эффекта Джоуля — Томсона, начальное сжатие равно 200 атмосферам, а в машинах Клода — около 40 атмосфер. Таким образом, успешным построением машины на основе турбодетандера в технику получения низких температур был введен новый принцип — принцип машин низкого давления. Эффективность этих машин, особенно для целей разделения воздуха, подтвержденная практикой их промышленного применения в СССР и за рубежом, чрезвычайно высока. Советскими инженерами была проделана большая работа по дальнейшему усовершенствованию и внедрению этого метода.

В настоящее время техника получения больших количеств кислорода, имеющего столь важные применения в металлургии и в других областях техники в СССР и за рубежом, пошла именно по пути использования машин с турбодетандером, указанному П. Л. Капицей.

Из физических явлений, наблюдаемых при самых низких температурах, наибольший интерес представляет, как известно, сверхпроводимость металлов и сверхтекучесть гелия II. Последнее явление было открыто и весьма детально — теоретически и экспериментально — исследовано советскими физиками. При температуре $2,19^{\circ}\text{K}$ (так называемая λ -точка) гелий, оставаясь жидкостью вплоть до самых низких достигнутых температур, переходит в состояние, называемое гелием II, в котором он обладает рядом поразительных свойств. Одним из наиболее замечательных свойств гелия II является его необычайно высокая теплопередача в узких капиллярах, открытая Кеезомом и его дочерью (Голландия). С другой стороны, опыты Капицы показали, что даже наиболее тщательные определения вязкости при протекании гелия II через узкие щели могут дать только верхний предел ее величины: истинное значение вязкости настолько мало, что оно не поддается определению. Но легко видеть, что ничтожная вязкость находится в противоречии со сверхтеплопроводностью. Действительно, передача тепла путем теплопроводности предполагает передачу импульса и энергии от атома к атому, т. е. предполагает взаимодействие между атомами. Но при этом условии вязкость не может быть исчезающе малой. Этот кажущийся парадокс был разрешен рядом тонких и вместе с тем замечательных по своей наглядной убедительности экспериментов Капицы, которые показали с полной очевидностью, что высокая теплопередача в гелии II объясняется не его теплопроводностью, а переносом тепла конвекцией: гелий II есть жидкость не сверхтеплопроводящая, но сверхтекучая. Таким образом, опытами Капицы было открыто и детально исследовано новое явление — сверхтекучесть.

Процесс теплопередачи в гелии II изучался как в щелях и капиллярах, так и в свободном гелии II. Для изучения теплопередачи в свободном гелии II оптическим путем П. Г. Стрелков построил оптический дьюар с плоскопараллельными оптически отполированными фланцами, позволявший применить известный оптический метод Теплера.

Объяснение сверхтекучести гелия II было дано Л. Д. Ландау после предварительных работ Ф. Лондона и Э. Тиссы. Вообще говоря, сверхтекучесть является квантовым свойством гелия II. В самом деле, при температуре $2-3^\circ\text{K}$ длина волны де Бройля становится сравнимой с междоатомными расстояниями в жидкости, вследствие чего в свойствах гелия II должны обнаруживаться квантовые явления. Эти квантовые свойства обнаруживаются уже в том, что гелий II остается жидким вплоть до температуры абсолютного нуля, тогда как, согласно классической физике, при абсолютном нуле все тела должны находиться в твердом кристаллическом состоянии. Интересно отметить, что гелий является единственной существующей в природе квантовой жидкостью; все другие жидкости затвердевают значительно раньше, чем в них начнут проявляться квантовые свойства.

Рассматривая гелий II как квантовую жидкость, Ландау в своей теории прежде всего устанавливает энергетический спектр этой жидкости, т. е. совокупность ее уровней энергии. При этом, поскольку речь идет о системе сильно взаимодействующих частиц, имеются в виду уровни всей жидкости в целом, но не отдельных ее атомов. Хотя такая задача полностью неразрешима, на основании общих теоретических соображений можно сделать ряд утверждений, достаточных для объяснения свойств гелия II. Ландау пользуется при этом допустимым в квантовой механике рассмотрением слабо возбужденных состояний как совокупности «элементарных возбуждений», которым, в свою очередь, сопоставляются «квазичастицы». Напомним, что, например, тепловое возбуждение кристалла можно рассматривать либо как дебаевские тепловые волны, распространяющиеся в кристалле, либо как совокупность квазичастиц — звуковых квантов, фононов, сопоставляемых этим волнам подобно тому, как фотоны сопоставляются электромагнитным волнам. В теории Ландау рассматриваются два основных типа энергетических спектров макроскопических систем — в одном соответствующие квазичастицы подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна (бозе-частицы), в другом — статистике Ферми (ферми-частицы). При этом оказывается, что жидкий гелий должен обладать спектром типа бозе-частиц, тогда как спектр ферми-частиц, вообще говоря, не приводит к сверхтекучести. На основании подобных весьма общих соображений о свойствах квантовой жидкости Ландау не только объяснил свойства гелия II, но и успешно предсказал ряд новых явлений.

Для дальнейшего развития теории гелия II существенное значение имела работа Н. Н. Боголюбова (1947), в которой изящным образом решалась задача об энергетическом спектре неидеального бозе-газа, т. е. бозе-газа со слабым взаимодействием между частицами. Смысл такой постановки задачи состоит в том, чтобы на простой, хотя бы и схематической, модели рассмотреть, каким образом мог возникнуть энергетический спектр макроскопического тела со свойствами, описанными теорией квантовой жидкости Ландау. Действительно, оказалось, что энергетический спектр неидеального бозе-газа подобен спектру гелия II в теории Ландау.

Из теории сверхтекучести следовало далее, что в гелии II возможно существование двух видов движения: один вид соответствует движению обычной вязкой жидкости, другой — движению идеальной жидкости, не обладающей вязкостью. Иначе говоря, гелий II в известном смысле можно рассматривать как смесь двух жидкостей: обыкновенной и сверх-

текучей. Из этого следует, что при перемещении в гелии II твердого тела будет увлекаться только «обыкновенная» часть гелия II, тогда как сверхтекучая будет оставаться неподвижной. Этот парадоксальный вывод теории был подтвержден опытами Э. Л. Андроникашвили, в которых изучались крутильные колебания стопки металлических дисков, погруженной в гелий II.

Одним из наиболее интересных следствий теории Ландау является необходимость существования в гелии II, наряду с обычным или первым звуком, еще так называемого «второго звука» — тепловых волн, распространяющихся со скоростью, существенно отличающейся от скорости первого звука. Второй звук был предсказан Ландау, а его излучение источниками различного типа рассчитано Е. М. Лифшицем. Экспериментально второй звук был обнаружен и детально исследован В. П. Пешковым. Взаимодействие между элементарными возбуждениями в гелии исследовали Ландау и Халатников. Это позволило Халатникову вычислить кинетические коэффициенты гелия — вязкость, теплопроводность и т. д.

Кроме сверхтекучей квантовой жидкости — жидкого He^4 , широко исследовался и другой изотоп гелия — жидкий He^3 . В СССР эти исследования проводились Б. Г. Лазаревым и Б. Н. Есельсоном в Харькове и В. П. Пешковым в Институте физических проблем в Москве. Оказалось, что жидкий He^3 не является сверхтекучим, во всяком случае при температурах выше $5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K}$. Как уже сказано, это связано с тем, что элементарные возбуждения в He^3 обладают статистикой фермиевского типа. Теория такой ферми-жидкости была создана в 1956 г. Л. Д. Ландау. Ландау показал, в частности, что при очень низких температурах в такой жидкости могут распространяться колебания особого рода — нулевой звук, скорость которого, в отличие от обычного звука, не определяется сжимаемостью жидкости. Недавно нулевой звук в He^3 был обнаружен Абелем, Андерсоном и Уинтли в США.

С успехом исследовалось и явление сверхпроводимости. Здесь следует отметить теоретические работы Л. Д. Ландау и В. Л. Гинзбурга, Н. Н. Боголюбова, А. А. Абрикосова и Л. П. Горькова. Экспериментальному изучению сверхпроводимости были посвящены работы Л. В. Шубникова, А. И. Шальникова, Н. Е. Алексеевского. Работы Ландау были посвящены природе переходного состояния между сверхпроводящим и несверхпроводящим состояниями. Согласно его теории промежуточное состояние представляет собой смесь сверхпроводящих и нормальных слоев, чередующихся друг с другом. Эта слоистая структура была полностью подтверждена опытами А. И. Шальникова и Ю. В. Шарвина.

Широкое распространение получила макроскопическая теория сверхпроводимости В. Л. Гинзбурга и Л. Д. Ландау. Эта теория описывает поведение сверхпроводников вблизи точки фазового перехода в нормальное состояние. Достоинство теории состоит в том, что она позволяет исследовать сверхпроводники в сильных магнитных полях. В частности, на основе уравнений Гинзбурга — Ландау А. А. Абрикосов создал теорию сверхпроводников второго рода, к которым относится большинство сверхпроводящих сплавов. Эти сверхпроводники отличаются от обычных тем, что достаточно сильное магнитное поле проникает в них, не лишая их сверхпроводящих свойств. Теория Абрикосова объясняет это тем, что магнитное поле не распределено в этих сверхпроводниках непрерывно во всем объеме, а сосредоточено в отдельных нитях.

Большим событием в физике в 1957 г. явилось создание после ряда безуспешных попыток в течение сорока пяти лет, протекших со времени открытия этого замечательного явления, микроскопической, квантовой теории сверхпроводимости.

Экспериментальные исследования, выполненные в пятидесятых годах, показали, что критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние зависит от массы изотопов, образующих металл. Г. Фрëлих обратил внимание на то, что этот факт прямо указывает на роль решетки металла в возникновении сверхпроводимости. Следующий шаг сделал английский теоретик Л. Купер, который показал, что взаимодействие электронов, которые обладают энергиями, находящимися вблизи поверхности Ферми, с колебаниями решетки (фононами) таково, что оно может повести к возникновению притяжения между электронами. Как следствие этого притяжения электроны объединяются в пары с противоположно направленными спинами (куперовские пары). Эти пары представляют собой образования с целочисленным спином, подчиняющиеся поэтому статистике Бозе, а не Ферми. Это имеет решающее значение, так как механизм взаимодействия электронов проводимости с дефектами решетки и примесями, ведущий к рассеянию энергии электронов и возвращению их ниже уровня Ферми, т. е. в конечном счете к прекращению тока, на куперовские пары, не подчиняющиеся принципу Паули, не действует. С другой стороны, энергия, необходимая для разрыва пары, имеет хотя и малую, но конечную величину, что в свою очередь ведет к возникновению энергетической щели между нормальным и сверхпроводящим состояниями.

Таким образом, ниже критической температуры, наряду с нормальными электронами, имеются пары, образующие сверхпроводящий ток, — модель, аналогичная двухжидкостной картине сверхтекучести. Математическая теория была развита на основе этой физической картины Бардином, Купером и Шриффером в США; те же результаты были получены затем Н. Н. Боголюбовым изящным математическим методом.

Большое значение для расчета различных конкретных эффектов имела новая формулировка этой теории, предложенная Л. П. Горьковым. Это позволило Л. П. Горькову дать микроскопический вывод уравнений Гинзбурга — Ландау, а Л. П. Горькову и А. А. Абрикосову — развить теорию свойств сверхпроводящих сплавов, в которой учитывается конечность длины свободного пробега электрона в металле.

В последние годы сверхпроводящие сплавы получили определенное техническое применение для создания сверхпроводящих магнитов, позволяющих с очень малой затратой энергии получать сильные магнитные поля (в настоящее время примерно вплоть до 100 кэ). Значительное количество теоретических и экспериментальных работ было посвящено изучению низкотемпературных свойств несверхпроводящих металлов в сильных магнитных полях. Экспериментальные работы по эффекту де Гааза — Ван Альфена были выполнены Шёнбергом и Б. Г. Лазаревым с сотрудниками в Институте физических проблем. Поведение сопротивления металлов в магнитном поле (гальвано-магнитные свойства) изучалось П. Л. Капичей, Е. С. Боровиком, Б. Г. Лазаревым. Новый толчок таким исследованиям дали теоретические работы И. М. Лифшица и его учеников. Дело в том, что в большинстве предшествующих работ электроны в металле рассматривались фактически как свободные. Между тем в действительности они представляют собой квазичастицы со сложным энергетическим спектром. В работах И. М. Лифшица свойства металлов исследовались в общем виде, без упрощающих предположений о виде спектра. Оказалось, что вся динамика электронов проводимости, а с нею и разнообразные электронные свойства металлов — гальваномагнитные, высокочастотные, резонансные (а также многочисленные осцилляционные эффекты типа эффектов де Гааза—Ван Альфена, Шубникова—де Гааза и др.) — могут служить прекрасным индикатором энергетического спектра электронов

проводимости, в частности, такой его важнейшей характеристики, как форма поверхности Ферми, о которой ранее физики практически не имели никаких сведений. Соответствующие эксперименты были произведены Н. Е. Алексеевским и Ю. Ф. Гайдуковым в Институте физических проблем и Б. И. Веркиным и Е. С. Боровиком в Харькове.

Дальнейшие сведения об электронных свойствах металлов были получены при изучении металлов в высокочастотных полях. Здесь, следует отметить прежде всего явление циклотронного резонанса в металлах, по поводу которого см. разделы «Физика полупроводников» и «Магнетизм». Другие резонансные явления были найдены в экспериментах М. С. Хайкина и В. Ф. Гантмахера в Институте физических проблем. Весьма своеобразные аномалии термодинамических и кинетических свойств металла в области высоких давлений возникают вблизи точки, где меняется топология поверхности Ферми. Это явление, предсказанное И. М. Лифшицем, было впервые экспериментально обнаружено Б. Г. Лазаревым с сотрудниками.

Следует особо отметить, что основой прогресса в экспериментальном исследовании металлов явилась возможность получения очень чистых металлов, длина свободного пробега электрона в которых достигает нескольких миллиметров.

Физика диэлектриков

В этой области существенные результаты принадлежат школе А. Ф. Иоффе. Уже в своих ранних работах, выполненных совместно с В. К. Рентгеном, А. Ф. Иоффе показал, что, хотя электропроводность диэлектрических кристаллов носит главным образом ионный характер, фотопроводимость рентгенизированной или естественно окрашенной каменной соли обязана электронам. В связи с этим запутанная картина, наблюдаемая при прохождении тока через диэлектрик, главным образом обусловлена объемными зарядами, скопляющимися в разных местах.

Так, например, уменьшение силы тока с течением времени, наблюдающееся в большинстве диэлектриков, объясняется возникновением обратной электродвижущей силы, обусловленной объемными зарядами, скопляющимися вблизи электродов. Присутствие ничтожного количества посторонних примесей ведет к скоплению возле них ионов, создающих объемный заряд. Плодотворные в научном и практическом отношении исследования диэлектрических свойств аморфных тел выполнены П. П. Кобеко, А. П. Александровым, С. Н. Журковым и др.

В тесной связи с исследованием диэлектриков и полупроводников находится изучение так называемых сегнетоэлектриков. Типичным представителем их является сегнетова соль, отличающаяся аномально высокой величиной диэлектрической проницаемости и наличием гистерезиса — свойствами, характерными для ферромагнитных веществ, ввиду чего сегнетова соль и аналогичные ей вещества в последнее время часто называются ферроэлектриками. Обстоятельное экспериментальное и теоретическое исследование свойств сегнетовой соли было впервые выполнено в 1930—1932 гг. И. В. Курчатовым, Б. В. Курчатовым и П. П. Кобеко.

В 1945 г. Б. М. Вул и И. М. Гольдман открыли новый сегнетоэлектрик — титанат бария, отличающийся многими благоприятными свойствами по сравнению с самой сегнетовой солью и подобными ей кристаллами. Это открытие послужило толчком к многочисленным работам по исследованию сегнетоэлектриков нового типа, причем оказалось, что титанат бария является лишь одним из многих сегнетоэлектриков этого типа.

В последнее время сегнетоэлектрические материалы получают все большее применение в различных областях техники.

Современная феноменологическая теория перехода вещества в сегнетоэлектрическое состояние была создана В. Л. Гинзбургом. Им же была впервые высказана широко распространенная теперь точка зрения, согласно которой с микроскопической точки зрения сегнетоэлектрический переход вызывается тем, что при некоторой температуре исчезает модуль упругости для одного из нормальных колебаний кристаллической решетки.

Большое внимание уделено было проблеме электрической прочности. В работах В. А. Фока была построена наиболее полная и законченная теория теплового пробоя диэлектриков, изученного экспериментально Н. Н. Семеновым, Л. Д. Инге, А. Ф. Вальтером и др. Она хорошо описывала процесс разрушения диэлектриков в сильном электрическом поле при достаточно длительных нагрузках и относительно высоких температурах. При низких же температурах и кратковременных импульсах картина пробоя, как показали многочисленные исследования, существенно изменяется и имеет чисто электрическую природу. В связи с этим А. Ф. Иоффе ввел представление о лавинной ионизации как причине пробоя диэлектриков, сыгравшее фундаментальную роль в дальнейшем развитии физики диэлектриков и полупроводников. Среди последующих работ, полностью подтвердивших эту точку зрения, наиболее существенную роль сыграли исследования А. Ф. Вальтера и Л. Д. Инге, впервые доказавших, в частности, чисто электронную природу электрического пробоя. Дальнейшее развитие физики диэлектриков связано с исследованиями поляризации и диэлектрических потерь. Фундаментальные исследования в этой области проведены Г. И. Сканиви и его сотрудниками. В частности, Г. И. Сканиви дано объяснение факта существования высокой диэлектрической проницаемости в титанатах некоторых металлов и их твердых растворов. Эти работы послужили основой развития отечественного конденсаторостроения.

Влияние структуры высокополимеров на их диэлектрические свойства исследовано П. П. Кобеко с сотрудниками.

В послевоенные годы общее развитие физики твердого тела привело к более детальному изучению электронной структуры и электронных спектров диэлектрических кристаллов. В работах С. И. Пекара и его сотрудников получила развитие высказанная ранее Л. Д. Ландау идея о том, что в ионных кристаллах подвижные электроны существуют в так называемых поляронных состояниях, т. е., поляризуя вокруг себя кристаллическую решетку, электрон оказывается связанным с окружающим его «облаком поляризации» и движется вместе с ним, благодаря чему сильно увеличивается эффективная масса такого образования, уменьшается его подвижность и т. д. Аналогичные представления о сильной связи движения электронов с движением кристаллической решетки были использованы М. А. Кривоглазом, С. И. Пекаром и рядом других авторов для описания природы так называемых центров окрашивания ионных кристаллов и характерных особенностей их оптических спектров.

Физика полупроводников

Исследование полупроводников за последнее время выдвинулось как важнейшая научная и научно-техническая проблема. С точки зрения электрических свойств полупроводники охватывают наиболее обширный класс тел, встречающихся в природе. На свойствах полупроводников основаны многочисленные технические устройства — выпрямители, фотоэлементы, термисторы, полупроводниковые триоды (транзисторы) и ряд других.

Исследования по физике полупроводников в Советском Союзе были начаты в тридцатых годах по инициативе А. Ф. Иоффе, настойчиво подчеркивавшего возможности использования полупроводников как преобразователей энергии: фотоэлементов, термоэлементов и т. п. Уже в предвоенные годы советскими физиками был получен ряд результатов, имевших фундаментальное значение для дальнейшего развития физики полупроводников.

Физические свойства полупроводников в основном определяются структурой их электронного спектра. В соответствии с этим электропроводность полупроводников может иметь весьма различную природу и происхождение в зависимости от того, возбуждаются ли электроны в зону проводимости тепловым движением из валентной зоны (собственная проводимость), или светом (фотопроводимость), или вводятся с какими-то примесями (примесная проводимость). При этом примесь может либо отдавать свой электрон в зону проводимости (донор), либо захватывать электрон из валентной зоны, образуя там «дырку» (акцептор). Именно наличие разных типов проводимости и возможность управлять ими лежит в основе всех технических применений полупроводников.

Экспериментально существование собственной и примесной проводимостей и возможность их разделения были впервые продемонстрированы В. А. Жузе и Б. В. Курчатовым в 1932 г.

Согласно современным представлениям уровни электронов в кристаллах образуют широкие «зоны» тесно расположенных уровней, разделенные большими промежутками. Эти уровни принадлежат уже не отдельным атомам или молекулам, а всему кристаллу в целом, т. е. электрон может перемещаться по кристаллу. По образному выражению Я. И. Френкеля, электроны центров, образующих кристалл, «коллективизируются». Так как на каждом уровне, по принципу Паули, может находиться максимум два электрона, все уровни нижней, или валентной, зоны уже заполнены, тогда как верхняя зона остается свободной. Переход электрона из нижней зоны в зону проводимости требует большой энергии, значительно превосходящей среднюю энергию теплового движения, чем и объясняется плохая проводимость изоляторов и полупроводников при достаточно низких температурах (в целиком заполненной зоне тока быть не может, так как электрон лишен возможности ускоряться, т. е. набирать энергию поля, поскольку все соседние уровни заняты другими электронами).

Если, однако, тем или иным способом электрон перейдет из нижней, валентной, зоны в зону проводимости, то в последней появится электрон, обладающий способностью свободно перемещаться по кристаллу, а в валентной зоне появится пустое место, «дырка», эквивалентная положительному заряду. В 1938 г. Б. И. Давыдов доказал теоретически, а в 1941 г. В. Е. Лашкарев — экспериментально, что выпрямление тока на контакте двух полупроводников связано с наличием разных типов проводимости — электронной и дырочной — по разные стороны контакта. Эти представления легли в основу принципа работы электронно-дырочного перехода ($p-n$ -перехода) — центрального элемента всей полупроводниковой электроники. И. Е. Тамм показал, что на поверхности полупроводника должны возникать особые «поверхностные» уровни электронов, играющие большую роль в истолковании различных сложных явлений в реальных полупроводниках. В те же годы И. К. Кикоин и М. М. Носков открыли эффект возникновения электродвижущей силы при освещении полупроводника в поперечном магнитном поле, носящий теперь их имя и широко используемый для исследования электронных процессов в полупроводниках. Существенную роль в последующие годы сыграла работа Б. И. Давыдова, показавшего, что в полупроводниках, как

и в плазме, уже сравнительно небольшие электрические поля приводят к заметному отклонению от равновесия: температура электронов и дырок становится выше температуры решетки кристалла, в результате чего характеристики протекания тока становятся существенно нелинейными.

Изучение процесса прохождения электрического тока через полупроводник представляет большой интерес. Катастрофическое возрастание числа носителей тока при достижении определенной величины напряженности электрического поля (пробой) вызывается ударной ионизацией — процесс, хорошо известный из исследований электрического разряда в газах. В полупроводниках этот процесс также играет важную роль, но здесь он осложняется рядом явлений, характерных для полупроводника. Вопрос этот был исследован в работах Б. И. Давыдова и И. М. Шмушкевича, Л. В. Келдыша, В. А. Чуенкова и др.

Наряду с ударной ионизацией возрастание числа электронов в зоне проводимости полупроводника обусловлено и другим важным явлением — непосредственным переходом через запрещенную зону, туннельным переходом, или, коротко, — туннелированием. Л. В. Келдыш обратил внимание на роль колебаний решетки, — иначе говоря, испускания и поглощения фононов, — в процессе туннелирования. Именно он предсказал, что за счет взаимодействия с фононами туннелирование в полупроводниках может происходить при полях, значительно более слабых, нежели обычное туннелирование, происходящее между областями равных энергий. Важно отметить, что отчетливое возрастание проводимости за счет участия фононов в процессе туннелирования должно происходить при определенных потенциалах, непосредственно связанных с энергией фононов. Тем самым открывается новый путь для чувствительного определения собственных частот колебаний решетки.

Изучение процессов поглощения света кристаллами привело Я. И. Френкеля к разработке гипотезы о существовании особых состояний возбуждения, перемещающихся по кристаллу, но не связанных при этом с переносом электрического заряда.

Я. И. Френкель обратил внимание на то, что если в какой-либо ячейке идеального кристалла возникает возбуждение атома или молекулы, то это возбуждение может передаваться резонансным путем от ячейки к ячейке. Благодаря этому по кристаллу будет распространяться волна возбуждения, с которой будет связана миграция энергии без переноса заряда. Этой волне возбуждения можно сопоставить квазичастицу, которую Я. И. Френкель назвал «экситоном». Эта идея оказалась в высшей степени плодотворной. Она позволила объяснить некоторые своеобразные особенности внутреннего фотоэффекта в закиси меди, экспериментально открытые А. В. и А. Ф. Иоффе, но казавшиеся непонятными; она открыла путь для понимания механизма поглощения света и легла в основу теории поглощения света молекулярными кристаллами, развитой А. С. Давыдовым (см. стр. 242). Впоследствии Ванье и Мотт несколько конкретизировали представление об экситоне, рассматривая систему из электрона и положительной «дырки», связанных кулоновскими силами, как квазиводородный атом или, точнее, квазицозитрон, поскольку эффективные массы электрона и «дырки» одного порядка, а Е. Ф. Гросс и его сотрудники открыли и подробно исследовали в некоторых полупроводниках при низких температурах «водородоподобный спектр», представляющий собой совокупность узких линий, сходящихся к пределу и удовлетворяющих формуле типа бальмеровской. Они доказали, что этот спектр принадлежит экситону — квазичастице, способной двигаться по кристаллу.

В работах В. М. Аграновича, В. Л. Гинзбурга, С. И. Пекара и многих других авторов было выяснено, что наличие экситонов может существенно

изменить оптические свойства кристаллов. Показатель преломления среды становится при этом функцией не только частоты, но и волнового вектора света, что приводит к появлению новых типов электромагнитных волн в кристалле и ряду других принципиальных эффектов.

Когда энергия фотона достигает ширины запрещенной области, отделяющей валентную зону от зоны проводимости, возникает сильное поглощение света полупроводником. При меньшей энергии фотона полупроводник, свободный от примесей и других центров поглощения света, практически прозрачен. Поэтому поглощение света в достаточно чистом полупроводнике характеризуется резким краем со стороны длинных волн. Л. В. Келдыш показал, что в электрическом поле, из-за возможности заимствования электроном энергии от поля, край полосы поглощения размывается и смещается в сторону длинных волн. Это предсказание было подтверждено экспериментальными исследованиями, а само явление — смещение края поглощения в сильном электрическом поле — в литературе получило название эффекта Келдыша — Франца, так как независимо от Келдыша это явление было предсказано также немецким физиком Францем.

Особенно бурное развитие физики полупроводников началось с конца сороковых годов после открытия транзистора и появления новых полупроводников — германия, кремния, антимонида индия, арсенида галлия и др., по своим качествам намного превосходящих традиционные полупроводники типа закиси меди, селена и т. п. В создании полупроводниковой электроники в СССР большую роль сыграли работы В. С. Вавилова, Б. М. Вула, С. Г. Калашникова, В. Е. Лашкарева, Д. Н. Наследова, Н. А. Панина, А. В. Ржанова, В. М. Тучкевича и их сотрудников.

Огромную роль в эти годы сыграли идеи А. Ф. Иоффе о возможности преобразования одних видов энергии в другие с помощью полупроводников. В 1950 г. А. Ф. Иоффе построил теорию термоэлектрического преобразования в полупроводниках и наметил программу дальнейших исследований в этой области. В значительной мере благодаря трудам созданного им Института полупроводников АН СССР коэффициенты полезного действия термоэлектрических преобразователей сейчас на порядки величины превышают те значения, которые имелись в тридцатых годах. В десятки раз выросли за это время и коэффициенты полезного действия полупроводниковых фотоэлементов («солнечные батареи»).

Потребность техники, а также возможность работать с очень чистыми монокристаллами создали условия для широкого фронта чисто физических исследований полупроводников, благодаря чему в настоящее время свойства и электронная структура полупроводников изучены и поняты в значительно большей степени, чем свойства любого другого класса твердых тел. Большую роль при этом сыграла и исключительная чувствительность полупроводников к самым различным внешним воздействиям, позволившая сравнительно легко экспериментально определять различные особенности их электронных спектров. Центральную роль в этих исследованиях сыграло явление циклотронного резонанса, основанное на квантовании уровней энергии электрона в магнитном поле, предсказанном Л. Д. Ландау еще в тридцатых годах («уровни Ландау»). Весьма эффективным для исследования полупроводников оказался также предложенный и теоретически изученный Г. Л. Биром и Г. Е. Пикусом эффект воздействия одноосной деформации: такая деформация, понижая симметрию кристалла, расщепляет его энергетические уровни, что приводит ко многим ярко выраженным качественным изменениям электронных свойств.

В последние годы наибольший интерес в физике полупроводников привлекли исследования излучения света полупроводниками при реком-

бинации электронов и «дырок» и, в частности, стимулированного когерентного излучения (полупроводниковые лазеры). Первые предложения об использовании полупроводников в этих целях были высказаны Н. Г. Басовым, Б. М. Вулом и их сотрудниками, указавшими также наиболее перспективные методы возбуждения стимулированного излучения в полупроводниках и ряд преимуществ, которые могут иметь полупроводниковые лазеры по сравнению с другими. В осуществлении этих идей важную роль сыграли работы Д. Н. Наследова, А. А. Рогачева, С. М. Рывкина и Б. В. Царенкова, впервые экспериментально исследовавших рекомбинационное излучение арсенида галлия, на основе которого вскоре были созданы первые полупроводниковые лазеры.

Прохождение сильных токов через полупроводники, как сейчас выяснилось, часто сопровождается развитием различных неустойчивостей, т. е. раскачкой колебаний электронно-дырочной плазмы, электронной плазмы, кристаллической решетки и т. п., подобно тому, как это происходит в обычной плазме. Изучение этого круга явлений привлекло в последние годы пристальное внимание, поскольку они могут быть использованы для генерации и усиления электромагнитных колебаний в широком диапазоне частот — от самых низких до сверхвысоких. В создании теории этих явлений и предсказании ряда новых типов волн в твердотельной плазме существенную роль сыграли работы О. В. Константинова и В. И. Переля. Одно из первых экспериментальных наблюдений неустойчивости тока в полупроводнике принадлежит Ю. Л. Иванову и С. М. Рывкину (1958). Позднее С. Г. Калашниковым и И. А. Куровой был обнаружен новый класс низкочастотных неустойчивостей, характерных для полупроводников. Последнее время все больший интерес привлекает исследование новых классов полупроводников, в частности жидких. Ведущее место в этой области занимают работы А. Р. Регеля и его сотрудников.

Механические свойства твердых тел

Важные результаты, относящиеся к изучению механических свойств твердых тел, были получены А. Ф. Иоффе и его обширной школой.

С точки зрения современной физики твердое тело — это кристалл. Но реальные твердые тела, с которыми мы имеем дело в технике и в повседневной жизни, по своим механическим свойствам сильно отличаются от идеальных кристаллов. Идеальное кристаллическое тело по прекращении деформации должно тотчас же вернуться к своему первоначальному состоянию, но на самом деле всякая упругая деформация вызывает в твердом теле лишь медленно исчезающий след — упругое последствие. Как объяснить это противоречие? Прежде всего твердые тела, в которых наблюдается последствие, усталость и другие явления, на самом деле вовсе не являются однородными кристаллами. А. Ф. Иоффе в одной из своих ранних работ показал, что в кристалле кварца истинного последствия не наблюдается. Таким образом, все явления, происходящие за пределом упругости, являются результатом физической неоднородности твердого тела.

При достаточной величине деформации твердое тело начинает течь как вязкая жидкость. Механизм такой пластической деформации также раскрыт А. Ф. Иоффе, который впервые применил с этой целью рентгенографический анализ, наблюдая на флуоресцирующем экране картину Лауэ при растяжении каменной соли. Оказалось, что когда растягивающее усилие переходит известный предел (предел текучести), пятна рентгенограммы внезапно раздваиваются, затем умножаются и, наконец, вытягиваются

в целые хвосты. Это показывает, что механизм пластической деформации заключается в том, что цельный кристалл распадается на отдельные мелкие кристаллики, которые смещаются и поворачиваются друг относительно друга. Эти работы А. Ф. Иоффе дали толчок развитию целой новой области (рентгенографический анализ пластической деформации), которой посвящены сотни работ, выполненных во всех странах. Мы не имеем возможности здесь охарактеризовать многочисленные дальнейшие работы учеников и сотрудников А. Ф. Иоффе в этом направлении. Отметим только два факта. Во-первых, И. В. Обреимов при помощи разработанного им тонкого оптического метода показал, что сдвиги по определенным кристаллографическим плоскостям начинаются задолго до появления искажений в рентгеновской картине. Во-вторых, А. Ф. Иоффе обнаружил, а М. В. Классен-Неклюдова детально исследовала совершенно новый эффект: прерывистость процесса деформации. При непрерывно приложенной нагрузке деформация идет скачками, повторяющимися через поразительно одинаковые промежутки времени и сопровождающимися легким звуком, напоминающим тиканье часов. Явление это изучалось целым рядом советских ученых (Н. Н. Давиденков, А. В. Степанов), а также за границей. Теория его была дана Н. Н. Давиденковым и М. В. Классен-Неклюдовой.

Механическим свойствам твердых тел было посвящено большое количество работ, выполненных также и в других лабораториях. Отметим здесь многочисленные работы В. Д. Кузнецова и его сотрудников. Ими были разработаны удобные методы измерения твердости и других механических констант твердых тел, изучено влияние различных факторов на предел упругости, поверхностная энергия твердых тел и т. д. Результаты всех работ сведены В. Д. Кузнецовым в монографии «Физика твердого тела».

Применению рентгенографического анализа к изучению механических свойств твердых тел было посвящено столь значительное количество работ советских физиков, что мы не имеем здесь никакой возможности ни охарактеризовать эти работы, ни назвать их авторов. Мы отметим лишь несколько работ, носивших пионерский характер. С. Т. Конобеевскому и Н. Е. Успенскому принадлежит первая в литературе обстоятельная работа по применению рентгенографического анализа к изучению внутреннего механизма процессов обработки металла (вальцовки). Н. Я. Селяков и Г. В. Курдюмов впервые показали, что закаленная сталь имеет кристаллическую решетку, отличную от решетки железа. В физике металлов — металловедении — применение рентгеноструктурных методов приобрело важнейшее значение. Особенно разносторонние и обширные исследования в этой области принадлежат Г. В. Курдюмову и его многочисленным сотрудникам. Эти важные с научной и практической точек зрения работы были посвящены строению сплавов, природе закалки и отпуска и другим проблемам, представляющим самый непосредственный интерес и большое значение для металлургии.

С помощью рентгеноструктурного анализа определена структура многих силикатов и развиты общие соображения о роли плотной упаковки в структуре неорганических соединений (Н. В. Белов); получены новые данные относительно строения органических кристаллов (А. И. Кий-тайгородский); систематическая работа по применению рентгеноструктурного анализа к теоретической химии выполнена Г. С. Ждановым.

Нельзя не отметить также и большую организаторскую работу, проделанную в этой области. Рентгенографический анализ является в настоящее время незаменимым подспорьем для заводских лабораторий. Рентгеновская лаборатория на заводе, особенно на металлургическом, выполняет весьма важную функцию. Благодаря развитию у нас работ

в области рентгенографического анализа заводские рентгеновские лаборатории получили кадры подготовленных работников, и в самой организации этих лабораторий, в пропаганде их важности на производстве была проделана значительная работа.

Как самостоятельный метод структурного анализа большое развитие получил электронографический анализ (В. Е. Лашкарев, З. Г. Пинскер, Н. А. Шишаков, Б. К. Вайнштейн и др.), с помощью которого определены структуры ряда неорганических и органических соединений. Обстоятельный обзор советских работ в этой области дан З. Г. Пинскером в монографии «Дифракция электронов» (Москва, 1949).

Очень большое внимание в СССР и за границей привлекли работы А. Ф. Иоффе по изучению прочности твердых тел. Теория кристаллической решетки, разработанная Борном, давала возможность вычислить, какие усилия необходимы для разрыва кристаллов. Эти вычисленные значения усилий оказались во много раз больше реально наблюдаемых. Так, каменная соль теоретически должна выдерживать напряжения до 200 кг/мм^2 , тогда как на самом деле она разрывается при нагрузке всего в 400 Г/мм^2 . А. Ф. Иоффе показал, что это расхождение объясняется свойствами поверхности кристалла. Погрузив кристалл каменной соли в теплую воду, он достиг упрочнения его в 10—12 раз. А. Ф. Иоффе объяснил это упрочнение растворением поверхностного слоя и уничтожением таким путем поверхностных трещинок, сильно понижающих предел прочности. Работы эти произвели большое впечатление во всем мире и вызвали оживленное обсуждение, в итоге которого как экспериментальные результаты, так и теоретические предпосылки А. Ф. Иоффе были подтверждены.

Дальнейшие успехи в области понимания природы прочности и пластичности твердых тел связаны с развитием теории дислокаций. Основополагающая роль в этом вопросе принадлежит Я. И. Френкелю. В дальнейшем в этом направлении можно отметить как работы по изучению дислокационной структуры деформированных и упрочненных материалов, так и работы по изучению влияния дислокаций на физические свойства кристаллов.

Отметим, далее, работы П. А. Ребиндера, показавшего, какую огромную роль в пластических свойствах образца играют поверхностные условия: введение на поверхность ничтожного количества поверхностноактивных веществ во много раз снижает предел текучести.

Работы П. П. Кобко, А. П. Александрова, Е. В. Кувшинского и др. на основе обширного опытного материала привели к широким обобщениям и новому пониманию упруго-релаксационных свойств высокомолекулярных соединений типа резин.

Из работ, ближе примыкающих к кристаллографии, отметим работы А. В. Шубникова, указавшего на важную роль понятия антисимметрии в описании свойств кристаллов. Ему же принадлежит ряд достижений в области теории и экспериментального осуществления роста кристаллов. Работы ранее руководимого А. В. Шубниковым Института кристаллографии АН СССР по выращиванию монокристаллов обеспечили отечественную промышленность кристаллами корунда, необходимыми для производства часов, пьезоэлектрическими, полупроводниковыми и другими кристаллами. Тепловым свойствам твердых тел были посвящены в высшей степени точные работы П. Г. Стрелкова.

Магнетизм

В области учения о магнетизме отметим прежде всего три принципиально важные работы, относящиеся к магнетизму элементарных частиц. В 1920 г., за год до опубликования известной работы Герлаха и Штерна

(1921), П. Л. Капица и Н. Н. Семенов разработали проект метода определения магнитного момента атома путем измерения отклонения атомного луча в неоднородном магнитном поле и дали полный расчет установки. Это именно тот метод, при посредстве которого Герлах и Штерн независимо от советских ученых экспериментально доказали существование пространственного квантования *).

Второй принципиально важный результат относится к диамагнетизму свободных электронов. Хорошо известно, что с классической точки зрения газ свободных электронов в ограниченном объеме, например «газ» электронов проводимости внутри куска металла конечного размера, не должен обладать диамагнитной восприимчивостью. Бор наглядно объяснил это тем, что диамагнитные моменты орбит, описываемых электронами в магнитном поле, полностью компенсируются обратным моментом ломаной траектории электронов, отраженных от границ образца. Между тем известно, что металлы, вообще говоря, обладают диамагнетизмом, а некоторые, как, например, сурьма и висмут, имеют значительный диамагнитный момент. Это затруднение очень принципиально, и Бор считал его одним из важных проявлений непригодности классической физики для объяснения магнитных явлений.

Ландау показал, однако, что в квантовой теории дело обстоит иначе: искривленные траектории электронов в магнитном поле проектируются на плоскость, перпендикулярную к магнитному полю, в виде замкнутых окружностей, т. е. периодичны; поэтому они квантуются. При включении магнитного поля распределение электронов по уровням будет меняться и возникнет диамагнитный момент. Тем самым доказывается, что диамагнетизм свободных электронов есть чисто квантовое явление. Это своеобразное явление с тех пор так и называется диамагнетизмом Ландау.

Третья важная работа была выполнена и опубликована в 1937 г. Б. Г. Лазаревым и Л. В. Шубниковым (Харьков). Вследствие наличия спинового магнитного момента электрона этот спиновый парамагнетизм электрона — слабое явление. Но еще более слабым является ядерный парамагнетизм, так как он определяется собственными магнитными моментами протона и нейтрона, которые по порядку величины примерно в 1000 раз меньше магнитного момента электрона. Поэтому, когда Лазареву и Шубникову удалось обнаружить и измерить прямым экспериментом (при помощи магнитных весов) ядерную восприимчивость твердого водорода, охлажденного до 2°K , этот результат мог быть поставлен в один ряд с лучшими рекордами экспериментальной техники.

В связи с диамагнитными свойствами электронного газа можно поставить работу Я. Г. Дорфмана, который предсказал, что в полупроводниках и металлах должно наблюдаться резонансное поглощение электромагнитных волн. Причина этого резонанса по существу тождественна с той, которая ведет к диамагнетизму Ландау. Поскольку, однако, это явление состоит в резонансном поглощении переменного электромагнитного поля при совпадении частоты электрического вектора поля с частотой обращения электрического заряда вокруг магнитного поля, это явление совершенно аналогично ускорению частицы в циклотроне. Оно было названо поэтому циклотронным резонансом. Квантовая теория циклотронного резонанса была развита Динглем в Англии, а само явление

*) Ввиду того, что эта работа Капицы и Семенова в силу случайных исторических обстоятельств осталась малоизвестной, мы приведем здесь точную ссылку с названием работы. Работа была опубликована на английском языке в 1922 г., но датирована еще декабрем 1920 г.: *On the Possibility of an Experimental Determination of the Magnetic Moment of an Atom*, Журн. Русск. физ.-хим. о-ва. физ. отдел 50, вып. 4—6 (1922).—

в полупроводниках было обнаружено в США. Поскольку оно зависит от эффективной массы электрона, явление это служит для определения эффективной массы и, таким образом, изучение его открывает ценные возможности для физики твердого тела.

В металлах явление осложняется наличием скин-эффекта, препятствующего проникновению магнитного поля в металл. Однако строгая теория циклотронного резонанса в металлах, развитая М. Я. Азбелем и Е. А. Канером, позволила найти условия, при которых это явление можно наблюдать и в металле. С тех пор оно получило широкие применения.



Л. В. Шубников.

Одним из наиболее ярких достижений в физике за последние 20 лет было открытие Е. К. Завойским в 1945 г. так называемого «парамагнитного резонанса» (в настоящее время он чаще называется электронным спиновым резонансом для отличия от ядерного магнитного резонанса).

Явление состоит в том, что атомы или молекулы, обладающие «неспаренными» электронными спинами и ориентированные по правилам пространственного квантования сильным постоянным магнитным полем, переориентируются своими магнитными моментами перпендикулярным к постоянному слабым переменным магнитным полем электромагнитной волны. При этом в случае резонанса между частотой электромагнитного поля волны и частотой переориентации моментов атомов или молекул в твердом парамагнетике возникает резко выраженное селективное поглощение электромагнитной волны.

С исторической точки зрения существенно отметить, что еще в 1923 г. Я. Г. Дорфман *) указал на необходимость селективного поглощения электромагнитных волн, связанного с «перекидыванием» под влиянием переменного поля волны парамагнитных моментов, ориентированных перпендикулярным постоянным магнитным полем.

Открытие парамагнитного резонанса привлекло к себе чрезвычайно большое внимание. Высокая чувствительность картины резонанса к взаимодействиям между спинами электронов и ядер, обнаруживаемая по сверхтонкой структуре, а также — к взаимодействиям молекулы с окружающей решеткой — все это открывает широкие перспективы для использования явления как метода исследования молекулярной структуры и молекулярных взаимодействий. Появление превосходных, относительно простых в обращении приборов парамагнитного резонанса создало этому методу очень большую популярность среди химиков, биофизиков и вообще представителей смежных областей знания. Число работ, выполненных при помощи метода электронно-спинового резонанса, наверное, исчисляется тысячами. В СССР интенсивная разработка метода парамагнитного резонанса и его применений ведется в Казанском филиале Академии наук СССР под руководством Б. М. Козырева и С. А. Альтшулера.

Аналогичные явления электронного резонанса должны наблюдаться не только в парамагнетиках, но и в ферромагнетиках. Экспериментально ферромагнитный резонанс был открыт также Е. К. Завойским (и независимо Гриффитсом в США). Однако теория ферромагнитного резонанса была развита еще в 1935 г. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем, а сама идея ферромагнитного резонанса была выдвинута и обоснована в 1923 г. Я. Г. Дорфманом, указавшим в цитированной выше работе на значение открытого В. К. Аркадьевым еще в 1913 г. и затем изученного в двадцатых годах селективного поглощения электромагнитных волн в железных проволоках, названного Аркадьевым «магнитными спектрами».

Важнейшей проблемой в учении о магнетизме является объяснение сильной намагниченности железа и других ферромагнетиков. Уже в начале XX столетия было ясно, что причиной этого намагничивания должно являться особое молекулярное поле, но физическая природа этого поля не могла быть удовлетворительно объяснена в рамках классической физики: с одной стороны, из опытов с гиромагнитными явлениями (опыт Эйнштейна — де Гааза, опыт Барнетта) следовало, что носителями элементарного магнитного момента («элементарными магнетиками») в ферромагнетике являются электронные спины, а с другой стороны, магнитные взаимодействия между электронами слишком слабы, чтобы при их помощи можно было объяснить природу молекулярного поля. Эта загадка качественно разрешалась блестящей идеей Я. И. Френкеля, указавшего на то, что гораздо более сильные взаимодействия, нежели чисто магнитные, электроны должны испытывать вследствие квантовомеханического эффекта обмена, имеющего порядок величины электростатического взаимодействия. При этом энергетически наиболее выгодным должно быть такое состояние, при котором спины электронов в узлах кристаллической решетки располагаются параллельно. Как известно, такая же идея лежит в основе развитой позднее Гейзенбергом квантовой теории ферромагнетизма.

В дальнейшем было установлено, что магнитный момент ферромагнетика не постоянен во всем образце. Ферромагнетик в отсутствие внешнего поля разбивается на отдельные области — домены. Внутри домена момент постоянен, а сами домены расположены так, чтобы их поля ком-

*) J. D o r f m a n n, Zs. Phys. 17, 98 (1923).

пенсировались. Идея существования доменов была впервые высказана Ф. Блохом, а полная теория создана Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем.

Ряд важных работ по теории ферромагнетизма выполнен С. В. Вонсовским, Н. С. Акуловым, Н. Н. Боголюбовым, С. В. Тябликовым, Е. М. Кондорским и их сотрудниками. Важнейшей проблемой в исследовании ферромагнетизма является проблема технической кривой намагничивания. В этом направлении первые шаги были сделаны еще в двадцатых годах Н. С. Акуловым, сформулировавшим общий закон магнитной анизотропии. Дальнейшее развитие эти проблемы получили в работах С. В. Вонсовского, Я. С. Шура и др. Широкое применение в промышленности получили магнитные методы контроля качества металлов (магнитная дефектоскопия). Основные работы в этом направлении принадлежат В. К. Аркадьеву и Р. И. Янусу.

Важным классом магнитных тел являются антиферромагнетики. По своей структуре антиферромагнетик представляет собой две (или несколько) ферромагнитные кристаллические решетки, «подрешетки», которые вдвинуты друг в друга так, что их магнитные моменты взаимно компенсируются. Антиферромагнетизм был независимо предсказан Л. Д. Ландау и Неелем (Франция). Экспериментальное исследование этого явления в СССР было начато Л. В. Шубниковым, О. Н. Трапезниковой и С. С. Шалытом. Дальнейшее развитие теории антиферромагнетизма было произведено И. Е. Дзялошинским, который обобщил на этот случай теорию фазовых переходов второго рода Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица. В частности, удалось объяснить явление слабого ферромагнетизма, состоящее в неполной компенсации магнитных моментов подрешеток. Это явление и другие свойства антиферромагнетиков были подробно изучены А. С. Боровик-Романовым. Им также было открыто явление пьезомагнетизма — возникновения магнитного момента при деформации кристалла.

Техника получения сильных магнитных полей за последние годы вновь привлекает к себе внимание. Еще в 1924 г. П. Л. Капица в своей широко известной работе, выполненной в лаборатории Резерфорда, получил рекордные по силе магнитные поля в 500 000 гс в импульсе, длившемся несколько тысячных долей секунды. Особенно существенно было то, что, несмотря на сотрясение здания, вызванного мощным импульсом, остроумная постановка опыта позволила Капице изучить при таких сильных полях множество свойств материи. Наконец, в самое последнее время А. Д. Сахаров с сотрудниками путем сжатия магнитного потока при взрывах получил сверхсильные магнитные поля, измеряемые миллионами и в отдельных опытах — десятками миллионов (до 25 млн.) гс. Первый взрывной опыт по получению сверхсильных магнитных полей при взрывах был осуществлен в СССР еще весной 1952 г. *). В настоящее время сверхсильные магнитные поля получают также в США и в других странах, а в сентябре 1965 г. этому вопросу даже была посвящена международная конференция в Риме. Ясно, что эти эксперименты открывают совершенно новые перспективы исследования свойств материи в исключительных, ранее недостижимых условиях. Однако решение трудной задачи постановки измерений в подобных условиях есть, по-видимому, дело будущего.

А к у с т и к а

Самым разнообразным разделам акустики — от общей теории акустики движущейся среды и до проблем архитектурной акустики и практических методов точных измерений акустических величин — посвящены

*) А. Д. Сахаров, Взрывомагнитные генераторы, УФН 88, 725 (1966).

работы Н. Н. Андреева. Им создана большая школа советских акустиков, которые разрабатывают: теоретические вопросы распространения звука в неоднородной, слоистой и мутной среде с границами (Л. М. Бреховских, Л. А. Чернов); вопросы нелинейной акустики (Б. П. Константинов, К. А. Наугольных, З. А. Гольдберг, Л. Л. Полякова, П. Н. Кубанский); вопросы акустики движущейся среды (Д. И. Блохинцев); вопросы так называемой звуковой оптики, относящиеся к преломлению и фокусировке звуковых волн (Л. Д. Розенберг). Широкие исследования были проведены в 1930—1940 гг. в области музыкальной акустики группой сотрудников Научно-исследовательского института музыкальной промышленности (А. В. Римский-Корсаков, А. А. Харкевич, Б. П. Константинов, Н. А. Дьяконов, А. И. Белов, И. Г. Русаков, П. А. Матвеев и др.). Работы касались физики музыкальных инструментов, их материалов, конструкции и акустических свойств. По архитектурной акустике в тридцатых годах была выполнена серия работ в связи с проектированием Дворца советов. Большим достижением явилось успешное акустическое проектирование и озвучение Кремлевского дворца съездов (В. В. Фурдуев). С. Н. Ржевкин и Г. Д. Малюжинец провели ряд теоретических и экспериментальных исследований по особым резонансным поглотителям, позволяющим успешно разрешить проблему звукопоглощения в очень больших залах. В области ультразвука следует отметить работы П. А. Бажулина и работы И. Г. Михайлова по распространению ультразвуковых волн в жидкостях, а также работы С. Я. Соколова, создавшего оригинальный метод ультразвуковой дефектоскопии.

В последние годы советские акустики внесли большой вклад в развитие нового направления — квантовой акустики (Л. Д. Розенберг, Л. Г. Меркулов). Важные исследования были проведены по акустике океана (Л. М. Бреховских, И. Б. Андреева). Большой интерес представляют советские исследования речи и речевой связи (В. Н. Федорович, Л. А. Чистович).

III. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ. НАУЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА

В огромной степени выросли кадры физиков. До революции в России число физиков, занимавшихся научной работой, не превосходило 100 человек, сейчас у нас тысячи физиков, среди которых несколько сот докторов. Вместо немногочисленных, весьма скромно оборудованных лабораторий при кафедрах университетов мы имеем крупнейшие научно-исследовательские институты и многие сотни отраслевых технических институтов, в каждом из которых в той или иной степени ведутся физические работы.

Съезды и конференции играют в научной жизни страны большую роль. До революции в России более или менее периодически собирались «Съезды русских естествоиспытателей и врачей», где физике отводилась одна секция. В 1908 г. на таком съезде Лебедев с триумфом доложил о своей работе о давлении света на газы. После революции, начиная с упоминавшегося в начале статьи первого съезда 1918 г., в двадцатых и в начале тридцатых годов стали созываться съезды физиков с несколькими секциями. Число участников в них постоянно росло; почти во всех съездах принимали участие и крупные иностранные ученые (М. Борн, Дж. Дарвин, П. Дебай, Р. Поль и др.), выступавшие с докладами и в дискуссиях. Наконец, в послевоенное время объем работы и соответственно число участников и докладов настолько увеличились, что созыв общих съездов физиков стал нецелесообразным. На смену съездам пришли тематические конференции: по полупроводникам, спектро-

скопии, люминесценции, низким температурам, по различным ядерным проблемам и т. п. Число участников этих конференций также непрерывно растет, и приходится организовывать на некоторых конференциях две, а иногда и большее число секций. В последние годы участие иностранных физиков в работе этих конференций стало обычным явлением.

Русская научная литература по физике до революции была необычайно бедна. Несколько превосходных учебников, таких, как «Введение в акустику и оптику» Столетова, «Электричество» Эйхенвальда, университетские лекции по физике Умова, а также ряд литографированных лекций профессоров давали возможность студентам младших курсов изучать физику. Но для более глубокого изучения этой науки, в частности для изучения теоретической физики, необходимо было прибегать к монографиям и серьезным руководствам на иностранных языках. В качестве исключения можно назвать только пятитомный «Курс физики» О. Д. Хвольсона, сыгравший большую роль в поднятии уровня культуры в области физики в России и переведенный на немецкий и французский языки, но, впрочем, носивший скорее характер энциклопедии, с недостатками, присущими этого рода изданиям.

С самого начала революции издание научной, учебной и научно-популярной литературы было поставлено в совершенно ином, неизмеримо более широком масштабе. В результате за 50 лет литература по физике так выросла, что не только для специальных университетских курсов, но и для кандидатских экзаменов, а также для углубленного изучения тех или иных проблем почти по всем вопросам можно указать серьезные монографии и руководства на русском языке. Постепенно развивается также учебная и научно-популярная литература на языках народов СССР. Большое число советских руководств и монографий переведено на иностранные языки.

Обзор советской физической литературы мог бы составить предмет специальной статьи. Здесь мы ограничимся лишь отдельными примерами. Уникальный многотомный курс теоретической физики Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица занимает в мировой литературе по физике совершенно особое место. Ни на одном языке не существует курса теоретической физики высшего уровня, который соединял бы такую полноту охвата всей физики с полной оригинальностью: весь курс написан с единой точки зрения и является совершенной противоположностью обычным при таком масштабе эклектическим курсам. Некоторые тома «Теоретической физики» Ландау и Лифшица переведены на английский язык.

Многочисленные руководства почти по всем разделам теоретической физики и монографии по специальным вопросам, написанные Я. И. Френкелем, также отличались оригинальностью, хотя некоторые из них были спорными. Почти все они выходили в переводах на немецкий и английский языки. В. А. Фоку принадлежит руководство по квантовой механике и оригинальная монография по общей теории относительности. Большую роль в создании высокого уровня преподавания теоретической физики сыграли курсы «Основы теории электричества» И. Е. Тамма, «Статистическая физика» и «Введение в термодинамику» М. А. Леонтовича. «Основы квантовой механики» Д. И. Блохинцева, «Введение в статистическую физику» В. Г. Левича представляют собой доступное и вместе с тем достаточно серьезное руководство по этим трудным отделам теоретической физики. Позволю себе также упомянуть мою двухтомную «Атомную физику», которая приобрела широкое распространение в Советском Союзе и далеко за его рубежами (она переведена на несколько иностранных языков).

Важная проблема создания вполне современных курсов общей физики также с успехом решалась советскими авторами. Из большого числа

выходивших за истекшие 50 лет учебников упомянем получивший широкое распространение и переведенный на иностранные языки трехтомный университетский курс С. Э. Фриша и А. В. Тиморевой, являющийся итогом многолетнего преподавания авторов в Ленинградском университете. Опыт преподавания физики в Московском университете использован в многотомном «Общем курсе физики», каждая часть которого имеет самостоятельный интерес и значение. Вышедшие тома: «Механика» С. Э. Хайкина, а также «Механика» С. П. Стрелкова, «Оптика» Г. С. Ландсберга, «Электричество» С. Г. Калашникова отличаются большой свежестью, оригинальностью, тщательной дидактической продуманностью.

Ряд ценных монографий большого научного значения был выпущен за истекший период. Уже упоминалась монография А. А. Андропова, А. А. Витта и С. Э. Хайкина по нелинейным колебаниям. Упомянем «Физику кристаллов» и «Физику полупроводников» А. Ф. Иоффе, «Современное учение о магнетизме» С. В. Вонсовского, двухтомную монографию «Колебания молекул» М. А. Ельяшевича, М. В. Волькенштейна и Б. И. Степанова. «Космические лучи» Д. В. Скобельцына давали полную картину состояния вопроса ко времени выхода книги (1936), новая монография на ту же тему написана Н. А. Добротинным. Ограничимся этими примерами, хотя список можно было бы, конечно, продолжить.

Обогатили советскую литературу также и переводы важнейших иностранных руководств и монографий. «Теория электричества» Абрагама — Беккера, «Оптика» Друде и «Физическая оптика» Вуда, «Методы математической физики» Куранта — Гильберта, «Математическая физика» Мизеса — Франка и многие другие книги в хороших переводах теперь легко доступны советскому студенту и научному работнику. Большое число фундаментальных научных монографий иностранных авторов в течение последних 20 лет выпущено Издательством иностранной литературы (в настоящее время — издательство «Мир»), деятельность которого заслуживает большой благодарности. Отметим серию монографий по спектроскопии Кондона и Шортли, Герцберга, фундаментальные монографии по ядерной физике, монографии по полупроводникам, ультразвуку, пьезоэлектричеству и по многим другим актуальным проблемам физики.

Наконец, большое значение для подъема культуры в области физики сыграло издание трудов классиков науки, с большой любовью выпускавшееся Государственным издательством технико-теоретической литературы (ныне Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука») и Издательством Академии наук. За истекшие 50 лет были выпущены в прекрасных переводах и красивых изданиях труды Архимеда, Стэвина, Галилея, Ньютона, Гюйгенса, Лагранжа, Гильберта, Леонардо да Винчи, Фарадея, Гельмгольца, Майера, Ломоносова, Лебедева, Столетова, Эйнштейна и ряда других классиков нашей науки. В этом важном деле освещения истории физики особенно велики заслуги слишком рано скончавшегося президента Академии наук С. И. Вавилова, превосходно знавшего, любившего историю науки и обогатившего нашу литературу переводами и комментариями всех оптических трудов Ньютона, а также работами об оптических трудах Галилея и Ломоносова.

Наконец, очень ценными являются предпринятые Академией наук собрания трудов выдающихся советских ученых (Мандельштама, Папалекса, Вавилова, Лазарева, Френкеля).

Периодические издания, предназначенные для опубликования оригинальных работ и обзоров, также получили значительный рост. До революции для опубликования физических оригинальных работ существовал только один журнал: «Журнал Русского физико-химического общества.

Часть физическая». Его небольшой объем был достаточен для опубликования 30—40 работ в год, которыми практически исчерпывалась в то время оригинальная научная продукция по физике. Вторая часть этого журнала, выходившая также отдельно под названием «Вопросы физики», публиковала обзорные статьи и имела весьма скромные размеры.

После революции для публикации оригинальных работ были предназначены периодические издания: «Журнал экспериментальной и теоретической физики», «Журнал технической физики», «Известия Академии наук, серия физическая»; они имели своей задачей главным образом публикацию трудов научных конференций. Краткие сообщения о важнейших работах публиковались в «Докладах Академии наук». В течение последних лет продукция советских институтов и лабораторий настолько выросла, что перечисленных изданий оказалось совершенно недостаточно для своевременного опубликования работ. Ввиду этого было предпринято издание целого ряда новых специализированных журналов. Таковы: «Оптика и спектроскопия», «Кристаллография», «Электроника», «Атомная энергия», «Физика металлов», «Методика и техника физического эксперимента», «Акустический журнал» и др. Следует, однако, отметить, что даже и это сильно увеличенное число журналов не справляется с потоком поступающих в редакцию работ и публикация их затягивается на продолжительные сроки.

В огромной степени выросли также и средства научной информации о новых работах и о современном состоянии актуальных проблем физики. В 1918 г. начал выходить новый обзорный журнал «Успехи физических наук», который с тех пор выходит непрерывно. Журнал этот пользуется широкой известностью в СССР и за рубежом. Публикуемые в нем обзорные работы советских физиков широко цитируются в мировой научной литературе. Он полностью переводится на английский язык и издается Американским институтом физики под названием «Soviet Physics — Uspekhi». Многие статьи его переводятся также на другие языки. В 1953 г. Академией наук создан мощный Институт научной информации (в настоящее время — Всесоюзный институт научной и технической информации — ВИНТИ), который издает реферативные журналы по различным отраслям знания, в том числе, конечно, и по физике. Реферативный журнал «Физика» по полноте охвата мировой литературы по физике далеко превосходит аналогичные иностранные реферативные журналы.

Мы можем теперь подвести итог и вернуться к сказанному в начале статьи. Предыдущий, далеко не полный очерк развития физики в СССР за 50 лет говорит сам за себя: «вклады в область знания» (повторяя приведенные вначале слова Н. А. Умова) советских физиков с избытком покрыли долг нашей страны перед историей науки. В самом деле, работы наших физиков охватывают все области этой науки, и нет такого раздела, куда бы эти работы не внесли много существенно нового. Важные открытия в области физики, сделанные в нашей стране, продолжили новые пути в науке, создали новые направления, в значительной степени развиваемые советскими учеными, а также, конечно, и учеными зарубежных стран.