

©1994

## К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЯКОВА ИЛЬИЧА ФРЕНКЕЛЯ

### К ИСТОРИИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПРЕДСКАЗАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОТКРЫТИЯ ЭКСИТОНА

*Б.П.Захарченя, В.Я.Френкель*

В Физико-техническом институте им.А.Ф.Иоффе РАН экситон часто называют «физтеховской квазичастицей». Резон в подобной пространственной локализации имеется. В 1931 г. эта квазичастица была предсказана в работе заведующего теоретическим отделом ФТИ Якова Ильича Френкеля [1,2]. Спустя два десятилетия первое прямое экспериментальное доказательство существования экситона получил в ФТИ член-корреспондент АН СССР Евгений Федорович Гросс [3]. С серии работ его и его учеников, можно утверждать, начался период «бури и натиска» в исследованиях по физике экситонов и, шире, оптике полупроводников.\*

В настоящей небольшой статье, приуроченной к 100-летию со дня рождения Я.И.Френкеля (10 февраля 1894 г. — 23 января 1952 г.), рассказывается, в основном, о том, как обе эти работы —



\* С правильным пониманием масштабов укажем, что экситон в этом плане оказывается аналогом нейтрона. Резерфорд предсказал существование частицы без электрического заряда в Кавендишской лаборатории в 1919 г., а его ученик и сотрудник — Д.Чэдвик — открыл нейтрон там же, в 1932 г.

теоретическая и экспериментальная — были восприняты в самый первый период после их опубликования, т.е., соответственно, в начале 30-х и 50-х годов. Очень кратко указываются основные вехи на пути теоретической их разработки в тридцатые-сороковые годы и первые направления дальнейших экспериментальных исследований — в пятидесятые. Хотелось бы думать, что наша статья дополнит работы по истории экситонных исследований Френкеля, охватывающих во времени около 7 лет (1930–1936 гг.). В числе статей по истории экситонов нужно назвать [4–7], а также [8–10]. Отметим наконец, что роль Я.И.Френкеля в становлении физики экситонов подчеркнута, в частности, и тем обстоятельством, что его фотография помещена на первой странице фундаментальной коллективной монографии [11], издание которой было осуществлено к 50-летию «со дня рождения» экситона.\*

Когда в 1958 г. отмечалось 50-летие со дня рождения Л.Д.Ландау (кстати говоря, ставшего в 1927 г. после окончания Ленинградского государственного университета аспирантом Френкеля в ФТИ; аспирантура эта, впрочем, носила формальный характер, так как ни в каком руководстве Ландау не нуждался, как не нуждался в нем и оставленный для подготовки к профессорской деятельности за 10 лет до этого окончивший Петроградский университет Френкель) — его ученики преподнесли ему своеобразный подарок. Это были тяжелые мраморные скрижали. На них были записаны «10 заповедей» Ландау: формулы, в которые воплотились результаты его основных работ.

Пятидесятилетие Френкеля (10 февраля 1944 г.) пришлось на годы войны и никак не отмечалось, а сам юбиляр провел свой день рождения в переполненном вагоне поезда Горький–Москва. До 60-летия Френкель не дожил 2-х лет... Но если бы и ему были преподнесены подобные скрижали, то среди его заповедей, несомненно, почетное место заняла бы формулировка предсказания существования экситона — кванта возбуждения (или волны возбуждения), движущегося по кристаллу. В первых работах [1,2] 1930–1931 гг. Френкель показал, что наряду с известным ранее токовым возбуждением кристалла, при котором электрон отрывается от атома, расположенного в узле решетки, и принимает участие в проводимости (внутренний фотоэффект), возможно также и нейтральное (бестоковое) возбуждение. При таком возбуждении (сопровождающим поглощение фотонов с энергией, меньшей потенциала ионизации соответствующих атомов) электрон остается связанным с возникающей в узле решетки дыркой. Благодаря фундаментальному свойству трансляционной симметрии кристаллической решетки подобное связанное состояние — электронное возбуждение — не локализуется на одном узле, а распространяется в ней в виде «волны возбуждения». Подобной волне, в духе де Бройлевских представлений о дуализме (по Бору — дополнительности) свойств волна-частица, Френкель сопоставил квазичастицу, которую и назвал экситоном —

---

\* В кратком перечне авторов работ по физике конденсированного состояния, опубликованных в *Physical Review* и получивших широкое дальнейшее развитие, названы статьи [1,2] Я.И.Френкеля. В этот престижный список входят также статьи Д.Кирквуда, Д.Слэтера, В.Шокли, Д.Бардина, Е.Вигнера. Этот перечень приведен в работе [12], написанной в связи со столетием функционирования американского журнала *Physical Review* и опубликованной в посвященном юбилейной дате номере *Physics Today*.

«квантом возбуждения».\* Он теоретически проанализировал и предсказал ряд свойств экситонов: их аннигиляцию в решетке, взаимодействие с ее колебаниями, локализацию экситонов за счет вызываемой ими деформации («прилипание» электронов [15]), характер оптического спектра возбуждения экситонов.

Перейдем теперь к изложению истории работ Френкеля по теории экситонов и о том, как они были восприняты научным сообществом. К проблеме превращения света в тепло в кристаллах Френкель обращался и ранее в малоизвестной работе [16]. В ней содержалась попытка распространить на явления диссипации энергии в кристалле представлений о переносе энергии атомом в газе (для случая, когда этот перенос осуществляется посредством ударов второго рода). Как видно из статей [1,2], Френкель знал об экспериментальных исследованиях А. Беккереля и И.В.Обреимова по наблюдению линейчатых спектров кристаллов (в частности, солей редких земель и иода) при низких температурах — см. [1, с. 154–156]. Размышления об их особенностях, видимо, послужили стимулом для постановки вопроса о механизме поглощения света твердыми телами. Вот как в резюме к работе [1] автор формулирует ее основные результаты: «Исходя из аналогии между кристаллом и молекулой, показано, что электронное возбуждение, представляющее собой первую стадию поглощения света, не сосредоточено на отдельном атоме, а распространено между всеми атомами в форме «волн возбуждения», сходных со звуковыми волнами, с помощью которых может быть описано тепловое движение в кристалле» [1, с. 126]. Во второй части статьи [2] формулируются правила отбора, связанные с безызлучательным поглощением света кристаллами при низких температурах, и показывается, что совместное соблюдение законов сохранения энергии и импульса для кванта света и кванта возбуждения (т.е. экситона) приводит к тому, что при очень низких температурах (температурах жидкого воздуха и жидкого гелия) спектры поглощения твердых тел становятся в большей или меньшей степени линейчатыми, подобно спектрам газов [2, с. 167].

Остановимся теперь на откликах на работы [1,2]. В [17] было опубликовано письмо Я.И.Френкеля, из которого явствовало, что реакция на эти его работы в Цюрихе, где в то время находились занимавшиеся проблемами квантовой физики твердых тел ассистенты В.Паули–Г.Бете, Ф.Блох, Р.Пайерлс, — была сдержанной, если не отрицательной. Как видно из контекста письма, об этом в Ленинграде рассказал приехавший туда из Швейцарии Р.Пайерлс. Я.И.Френкель, находившийся в это время в годичной командировке в США, в ответном письме жене (от 1 апреля 1931 г.) писал: «Ты упоминаешь, что мою большую работу в *Phys. Rev.* в Цюрихе раскритиковали и постановили считать неверной. Считаю подобное мнение безусловно ошибочным — не только на основании своих бесед с американскими теоретиками, но и по внутреннему убеждению. То обстоятельство, что Паули считает мою работу falsch, доказывает лишь, по моему мнению, что она не trivial» [17, с. 283–284]. Это письмо не раз цитировалось в работах по физике экситонов [5,18,19]. Напомним, что Паули принадлежит ка-

\* Отметим, что «квантам упругости» (*Elastische Quanten*) И.Е.Тамма столь привычное ныне название «фононы» было дано Я.И.Френкелем в 1932 г. (см. [13,14]).

тегорическое суждение, которое он часто использовал при оценке тех или иных работ своих коллег: «Entweder falsch, oder trivial», т.е. «это или неверно, или тривиально». Стоит указать, что случай с экситонами — не единственный, в котором он оказался неправ. Так, он отверг идею о вращающемся электро́не (1925 г.), возражал против концепции зарядовой независимости ядерных сил (1937 г.), сильно сомневался в справедливости эффекта несохранения четности при слабых взаимодействиях (1957 г.).

Что касается физики твердого тела — а упомянутые выше его цюрихские ассистенты в рассматриваемое время занимались ее проблемами, — то Паули многократно заявлял: «Ich mag diese Physik des festen K6rpern nicht» (т.е. «Не люблю я эту физику твердого тела!»). Представляя — и снова в те же годы — одного из своих сотрудников коллеге, Паули несколько пренебрежительно сказал, имея в виду его работы в рассматриваемой области: «Он занимается какой-то чепухой!». Такого рода замечания особенно удивительны, так как Паули своим знаменитым принципом запрета, по существу, заложил основы квантовой физики твердых тел, да и выполнил к тому же (на основе этого принципа) работу по парамагнетизму электронного газа.\* В 1956 г., беседа с Л. Полингом, он не без некоторого удивления заметил, что за всю свою жизнь сделал только одну не математическую работу (нужно, наверное, сказать более точно: не тщательно оформленную математически, каковыми были все прочие его работы). И именно за нее получил Нобелевскую премию. Речь шла, естественно, о «принципе Паули» [21].

В июне 1931 г. Паули оказался в США, в Пасадине, на одном из съездов американского физического общества (член которого, Яков Ильич Френкель, тоже присутствовал на съезде). 15 июня 1931 г. он писал родным: «Я встретил на съезде ряд старых знакомых, в том числе Фаулера и Паули. Через час последний вместе с Гайтлером и еще одним немецким физиком зайдут за мной в гостиницу, чтобы организовать какое-нибудь совместное увеселение» [17, с. 297]. Что за увеселение намеревались организовать молодые в те годы теоретики, видимо, уже никогда не удастся узнать. Но несомненно то, что в разговорах Паули и Френкеля проблема поглощения света диэлектриками подвергалась дальнейшему обсуждению. Судить об этом можно на основании писем, которые Паули писал из США в Цюрих Пайерлсу. В письме от 1 июля 1931 г. наряду с резкой критикой (как мы теперь знаем, тоже несправедливой) работы Пайерлса по теории электропроводности («In Dreck soll man nicht w6hlen» — «Нечего копать в грязи» — категорически советовал Паули своему ассистенту), там имеются и такие строчки: «Если вопросы поглощения света Вы сможете трактовать более точно, чем в пределах порядковых оценок, — это будет хорошо. Но я к этому отношусь очень скептически. Френкель, возможно, вскоре придет в Цюрих или в Лейпциг, и Вы его в этом, может быть, сумеете убедить» [22, с. 85]. Позднее Паули писал: «... Надо быть несколько более внимательным в деле полемики с Френкелем. Не могли ли бы Вы с ним встретиться и убедить его? Он будет в Европе» [22, с. 89].

Интересный материал об экситонных работах Френкеля содержится в книге [23] известного физика-теоретика Д. Слэтера, коренного аме-

\* Я.И. Френкелю принадлежит простой и изящный вывод формулы для парамагнитной восприимчивости электронного газа, см. [20].

риканца, вступившего на арену теоретической физики еще в 20-е годы.\* Мы предположим этим суждением общую оценку, данную Слэтером Френкелю, с которым он, очевидно, познакомился в 1930–1931 гг. Слэтер отнюдь не относился к числу людей, симпатизировавших новой России и коммунистам, «отличаясь в этом плане, — как пишет он сам, — от большинства ученых, а особенно от тех, кто работал в университетах и среди которых многие с симпатией относились к коммунистам. Но, — продолжает он, — несмотря на эти мои политические пристрастия, Френкель для меня, как и вообще для американских физиков, является очень большим авторитетом.\*\* Он был физиком именно такого склада, которому я отдаю предпочтение. Его работы написаны прозрачно и понятно. Его книги по волновой механике, написанные на английском языке, относились к числу наиболее полезных среди изданных в те равные годы.\*\*\* Он внес выдающийся вклад в разные области физики»<sup>[23, с. 158]</sup>.

Слэтер полагает, что наиболее существенным стимулом для работы Френкеля по экситонам явились исследования, проводившиеся в конце 20-х — начале 30-х гг. в Геттингене, в лаборатории Р.Поля. Заметим здесь, что в работах Якова Ильича прямых ссылок на исследования Поля и его школы нет. Однако то обстоятельство, что 1926 г. Яков Ильич провел в Геттингене (где находился Институт Поля при университете), позволяет думать, что он знал о соответствующих исследованиях — и в этом плане утверждение Слэтера имеет основание. А. фон Хиппель, работавший в то время у Поля, эмигрировал в США и организовал в Массачусетском институте технологии (МИТ) экспериментальную лабораторию по исследованию диэлектриков. Первая работа, о которой он в 1936 г. рассказал Слэтеру, относилась к проблеме экситонов и развивала идеи Френкеля применительно к механизму распространения возбуждения в NaCl. В связи с этим Слэтер замечает, что спектрами NaCl с «экситонных» позиций занимался В.Шокли. Первый доклад будущего Нобелевского лауреата на физическом коллоквиуме в МИТ (март 1933 г.) как раз и был посвящен разбору работ Я.И.Френкеля<sup>[1,2]</sup>. А. фон Хиппель и В.Шокли, поддержанные Слэтером, заложили основы исследований по экситонам в МИТ. Важнейшие работы по физике экситонов в 30-е годы выполнили Р.Пайерлс<sup>[24]</sup>, Н.Мотт<sup>[25]</sup>, Г.Ванье<sup>[26]</sup> — о них кратко будет сказано ниже. Несколько ранее появилась и новая работа самого Я.И.Френкеля<sup>[15]</sup>, развивавшая идеи его предыдущих работ<sup>[1,2]</sup> и содержавшая контр-критику Пайерлса и некоторых других теоретиков, в частности — А.Вильсона. Та же критика прозвучала и в обзоре<sup>[27]</sup>,\*\*\*\* в котором Френкель с некоторым сожалением констатирует недостатки в интерпретации фотоэлектрических явлений в полупроводниках, связанные с преувеличе-

\* Выражаем признательность О.И.Новак, обратившей наше внимание на книгу Слэтера.

\*\* «great favorite»; по толковому словарю английского языка favorite — лицо (или вещь), предпочтительное в сравнении с другими.

\*\*\* Стоит отметить, что Слэтер в 1933 г. проценизировал «Волновую механику» (т. 1) Я.И.Френкеля на страницах одного из американских журналов.

\*\*\*\* Зававно, что в указанном обзоре<sup>[27]</sup> Френкель называет введенные им экситоны «псевдочастицами» — видно, что привычный ныне термин «казичастицы» получил свои права позднее 1947 г.

нием, по его мнению, роли зонной теории (см. в связи с этим и более поздние его работы [28,29]).

Мы видим, таким образом, что со стороны теоретиков интерес к физике экситонов во второй половине 30-х годов начал, хотя и не стремительно, но — возрастать. И несмотря на это, экситоны в эти годы с трудом пробивали себе дорогу. С.И.Пекар в своих воспоминаниях о Френкеле пишет о том, что экспериментальные наблюдения поглощения света в диэлектрике, не приводящие к фотопроводимости, обсуждавшиеся в то время на семинаре в ФТИ «... казались совершенно парадоксальными, так как, согласно общепринятой в те годы зонной теории, любое возбуждение электронов беспримесного диэлектрика приводит к появлению свободного электрона и дырки в зоне проводимости. Яков Ильич, — продолжает Пекар, — спросил недоумевающую аудиторию: «А в газе поглощение света, не приводящее к фотопроводимости, понятно?» Послышались голоса: «Конечно, понятно! Фотовозбуждение молекул без ионизации». — «Так и рассматривайте диэлектрик, как сжатый газ», — сказал Яков Ильич. В этом кратком предложении заключалась и вся идея экситонного поглощения света, разъясняющая парадокс, и демонстрация недостатков зонной теории» [30, с. 198]. Подчеркнем, что обращение Френкеля к экситонам в указанной выше статье [15] относится как раз к этому времени, и именно в ней возник и сам термин «экситон».

Здесь уместно сказать, что, кратко рассказывая о своих исследованиях по экситонам [1,2,15] в статье 1948 года, [27, с. 323], Яков Ильич предвзвешивает их изложению работы своего ученика и сотрудника по теоретическому отделу ФТИ — Б.И.Давыдова. Они были выполнены в 1937 г. и относились к теории электрического пробоя газов. Теория была основана «... на представлении о ступенчатой ионизации атомов, т.е. ионизации атомов, предварительно возбужденных (по крайней мере дважды) электронным ударом. Ввиду того, что пробой твердых кристаллических диэлектриков внешне весьма сходен с пробоем газов, необходимо допустить, в случае справедливости представлений Давыдова, что и в кристаллах диэлектриков атомы могут не только ионизоваться, но переходить в возбужденное состояние без отрыва от соответствующего электрона» [27, с. 323]. И затем, совершив инверсный переход во времени, Френкель пишет: «Исследуя этот вопрос в 1931 г., я показал, что состояние возбуждения может при этом перемещаться от одного атома к другому, подобно электрону или дырке, т.е. путешествовать по всему кристаллу, подобно элементарной частице, в соответствии с общими законами квантовой механики» (там же).<sup>\*</sup> Стоит ли говорить, что логическая цепочка рассуждений должна была быть обратной и совпадать с хронологической: в 1931 г. была установлена и обоснована возможность распространения волны возбуждения — экситона — по кристаллу. Естественно отсюда утверждать то же самое и о атомах (молекулах) газа и приложить это к объяснению эффекта электрического его пробоя — при меньших, чем энергия ионизации, значениях приложенной к нему разности потенциалов.

24 ноября 1930 г. Яков Ильич писал жене: «Последнее время я много работал и, в результате, сегодня заканчиваю свою статью. Она

<sup>\*</sup> Связь работ, которые послужили основанием для объяснения экситонного поглощения света твердыми телами, с исследованиями по газовому разряду (Б.И.Давыдова), отмечалась Френкелем и ранее — см. [31, с. 283].

далась мне не легко, но зато я ею очень доволен и считаю ее лучшим своим произведением по теории квантов. Завтра я сдаю ее в печать. Редакция Physical Review помещается тут же в Физическом институте, что весьма удобно и служит лишним импульсом для работы» [17, с. 254]. В свете этой авто-оценки представляется несколько странным, что впоследствии Френкель не выделял экситонные работы из ряда других, отдавая предпочтение (как видно из обзора [27]) другим своим исследованиям в разных направлениях теоретической физики. В этом плане его оценка расходится с принадлежащей историкам науки (и его коллегам-теоретикам), полагающим сейчас, что предсказание экситона и разработка его количественной теории относится к числу наиболее ярких и «пролагающих новые пути» достижений Якова Ильича. Можно думать, что охлаждение Френкеля к теории экситонов связано, как минимум, с двумя обстоятельствами. Во-первых, начиная со второй половины 30-х годов он главное внимание стал уделять физике фазовых переходов и теории плавления, физике ядра, геофизике. Из числа более 160 работ (сюда не входят книги и научно популярные статьи), опубликованных в 1937–1952 гг., т.е. после статьи 1936 г. об экситонах [15], он не более 5 раз — и то по довольно частным вопросам, обращался к проблемам электронной теории твердых тел. И во-вторых: его, несомненно, разочаровало то обстоятельство, что высказанные им рекомендации по постановке экспериментальных исследований по физике экситонов, о необходимости которых он не раз говорил на заседаниях ученого совета ФТИ в самые первые послевоенные годы, не получили поддержки. Те же из них, к изложению которых мы сейчас перейдем, проводились, можно сказать, спонтанно, а не по заранее намеченным и одобренным программам исследований в области оптики полупроводников. Потребовалось, таким образом, более двух десятилетий, чтобы френкелевская идея об экситонах и тщательно разработанная их количественная теория нашли себе экспериментальное подтверждение — случай, впрочем, не такой уж и редкий в истории физики, когда речь идет о работах, опережающих свое время.

Уже говорилось, что физическая модель бестоковых возбуждений — экситонов — в кристаллах применительно к полупроводникам была развита Г. Ванье и Н. Моттом в 1937 году. Согласно этой модели, квазичастица — экситон представлялась как электрон и дырка, связанные кулоновским взаимодействием, ослабленным в  $\epsilon$  раз, где  $\epsilon$  — высокочастотная диэлектрическая проницаемость кристалла. Из-за малости эффективных масс и довольно больших значений  $\epsilon$  в полупроводниках радиусы орбит такого экситона могут превосходить размеры элементарной ячейки в сотни и даже в тысячи раз. После этих работ стало принято говорить об экситонах малого радиуса (экситоны Френкеля, как раз и рассмотренные им в 1931 г.) и экситонах большого радиуса — экситонах Ванье–Мотта (Френкель называл их «мега-экситонами»). Первые обычно наблюдаются в диэлектрических так называемых молекулярных кристаллах ароматических углеводородов (бензол, антрацен, нафталин) и в био-кристаллах, а вторые — в кристаллах полупроводников. По существу, между этими моделями (экситонами) нет принципиальной разницы. Действительно, и в том и в другом случае экситову можно приписать импульс  $P_{ex} = \hbar k_{ex}$ ; это значит, что экситонные состояния в пространстве импульсов (точно

так же, как и электронные состояния в кристаллах) образуют энергетические зоны. Оптические переходы между ними возможны лишь на дно каждой из таких экситонных зон — из-за малости импульса фотона. Это обстоятельство, ясно сформулированное Френкелем, очень важно, так как предсказывает существование узких линий в оптических спектрах экситонов.

Поскольку экситон большого радиуса напоминает водородоподобный атом (или атом позитрония), его энергетический спектр должен состоять из сбегающихся к границе ионизации водородоподобных серий.

Как уже упоминалось, теоретическая модель экситона вначале плохо воспринималась экспериментаторами. Даже после того, как А.С.Давыдов в своей известной работе [32] сформулировал основной признак «экспериментального опознавания» экситонов малого радиуса в молекулярных кристаллах — существование дублета (давыдовское расщепление) с различно поляризованными компонентами, — поиски его начались не сразу.\* Очень важными для физики экситонов были опыты американских физиков Апкера и Тафта, выполненные в 1951 г. [34]. В них удалось доказать определяющую роль экситонов в формировании внешнего фотоэффекта в щелочно-галлоидных кристаллах. Специально отметим, что В.П.Жузе и С.М.Рывкин в ленинградском ФТИ привлекли понятие экситонов для объяснения аномалий фотопроводимости в закиси меди [35].

Однако, основным «экситонным экспериментом» стало наблюдение Е.Ф.Гроссом и аспирантом Н.А.Каррыевым (в руководимой Гроссом лаборатории ФТИ) в 1951 г. водородоподобной серии узких линий в спектре поглощения закиси меди [3]. Увидев этот спектр (в первых опытах удалось наблюдать до семи членов серии), — а его можно было увидеть глазом, так как он располагался в желто-зеленой области видимого спектра, Евгений Федорович немедленно сообщил об этом Якову Ильичу, приглашая его посетить свою лабораторию и увидеть собственными глазами экситонную серию. Увы, Френкель скончался в январе 1952 г., так и не успев посмотреть на этот спектр.

Гросс без колебаний идентифицировал наблюдавшуюся серию линий как оптический спектр экситона. Однако хотя уже вторая работа Гросса [36] была названа очень определенно: «Оптический спектр экситона», это открытие, имевшее, как мы уже говорили, огромные последствия для физики твердого тела, не сразу стало известно широкому кругу ученых. Причина этого заключалась в том, что первая и вторая статьи по экситонам [3,36] были опубликованы в журнале «Доклады Академии наук СССР», который, помимо того что (как и другие наши физические журналы тех лет) не переводился на английский язык, был вообще мало известен физикам за рубежом. Принять же участие в работе какой-либо конференции за рубежом и выступить на ней с докладом в сталинские времена железного занавеса было очень трудно, если и вообще возможно. В результате открытие экситонной серии в закиси меди в части зарубежных статей поначалу было несправедливо приписано японским физикам, опубликовавшим статью [37] о наблюдении экситонной серии в кристалле закиси меди через восемь

\* Об этих работах см. [33].



месяцев после Гросса, и к тому же неправильно ее интерпретировавшим. Несомненный приоритет Гросса убедительно доказывается в [18].

Приходится с сожалением отметить, что на пути первой публикации об экспериментальном обнаружении экситона возникли очень большие трудности. Тогдашний директор ФТИ А.П.Комар наотрез отказался представить статью Е.Ф.Гросса к публикации. Дело в том, что буквально перед открытием экситона одному из заведующих лабораторий ФТИ — Г.Д.Латышеву — была присуждена Государственная (тогда — Сталинская) премия за обнаружение тонкой структуры спектров конверсионных электронов. Эффект этот, увы, оказался липовым. Сочетание слов «тонкая структура» и «спектры», видимо, испугало директора ФТИ: времена были крутые. К тому же, в Киеве, из уст известного авторитета в области спектроскопии кристаллов прозвучало резкое мнение о том, что Гросс, скорее всего, наблюдал тривиальный интерференционный эффект. Это заявление Евгений Федорович особенно остро переживал. Его — виртуозного экспериментатора-спектроскописта, открывшего бриллюэновское рассеяние света, овиляли в тривиальной ошибке! Потребовалась упорная и длительная борьба, чтобы публикация была, наконец, разрешена.

Основным аргументом Е.Ф.Гросса в пользу экситонной природы наблюдавшегося им спектра, была узость спектральных линий, предсказанная еще Я.И.Френкелем. Дальнейшее развитие квантовой теории полупроводников и понимания экситон-фонового взаимодействия показали, что этот аргумент был верен, так как оптические переходы зона-примесь (если она даже водородоподобная) не могут давать узких линий в спектрах. Однако в 50-е годы это понимали плохо, и многочисленные оппоненты экситонной версии спектра требовали прямых экспериментов, доказывающих миграцию экситонов в кристалле, не смущаясь тем, что прямых экспериментов — в вульгарном понимании этого слова — в физике микромира практически не существует. Удивительно, но история с первоначальным неприятием теоретической модели экситона в начале 30-х годов, через 20 лет, в 1950-м, повторилась при его экспериментальном наблюдении.

Из этих «времен непризнания» одному из авторов (Б.З.) ярко запомнился доклад Е.Ф.Гросса (сделанный в 1954 или 1955 г.) на сессии Отделения физико-математических наук (теперь оно трансформировалось в Отделение общей физики и астрономии). Заседание сессии проходило в здании физического факультета Московского университета. Гросс рассказывал тогда об очень эффектных экспериментах по влиянию электрического и магнитного полей на спектр экситона в закиси меди. Кстати, к тому времени удалось наблюдать до 11 членов экситонной водородоподобной серии! Уже одно это поражало воображение. В самом деле, был получен десяток узких спектральных линий, да к тому же сбегающихся, как в атоме водорода, к границе ионизации! И это — в полупроводнике, где ранее, кроме монотонного, «скудного» нарастания поглощения у края, соответствующего переходу электрона из валентной зоны в зону проводимости, никакой структуры спектра вообще не наблюдалось.

На заседании было много звезд советской науки — в их числе П.Л.Капица, Л.Д.Ландау, И.Е.Тамм, В.А.Фок, А.И.Алиханов, В.И.Векслер, И.В.Курчатов (последний в сопровождении своих «духов» — телохранителей). Председательствовал на заседании

А.Ф.Иоффе. Доклад Евгения Федоровича был сделан не лучшим образом — это часто с ним случалось. Удивили точные и глубокие замечания и вопросы Л.Д.Ландау, в которых он не подвергал ни малейшему сомнению экситонную интерпретацию эксперимента. За докладом Гросса последовали многочисленные выступления оппонентов существования экситонов. В их числе был акад. А.Н.Теренин и ряд вузовских профессоров. Замечательным было заключительное слово Абрама Федоровича Иоффе. Идея его выступления состояла в том, что, хотя экситонную природу спектра, безусловно, нужно еще подтвердить дополнительными экспериментами, но, на его взгляд, изложенные Гроссом исследования знаменуют собой возникновение обширного направления в науке — оптики и спектроскопии полупроводников.

Это пророчество Абрама Федоровича блестяще оправдалось. Вскоре появились эксперименты, неоспоримо доказавшие наличие импульса у экситона. Многочисленные опыты по исследованию влияния магнитных и электрических полей на экситонные уровни позволили выяснить ряд своеобразных свойств этой квазичастицы. Были открыты экситонные поляритоны, локализованные экситоны, диамагнитные экситоны, сложные экситонно-примесные комплексы, строение которых удивительно напоминает строение сложных атомов. Была открыта оптическая ориентация экситонов, установлен эффект квантовых биений возбужденных состояний экситонов — тонкие явления, наблюдавшиеся ранее лишь в изолированном атоме. Без экситонной спектроскопии невозможно представить развитие современной физики квантово-размерных полупроводниковых структур. Обширный раздел оптики твердого тела возник в связи с попытками наблюдать бозе-конденсацию экситонов при возбуждении кристаллов мощными лазерными импульсами.

Но как бы ни была обширна и утонченна современная оптика экситонов в кристаллах, нельзя не помнить, что все началось с пионерской работы Якова Ильича Френкеля.

### Список литературы

- [1] Frenkel J. On the transformation of light into heat in solids. 1 // Phys. Rev. 1931. Vol. 37. N 1. P. 17–44. Перевод см. в кн.: Френкель Я.И. Собрание избранных трудов. Т. 2. Л.; М.: Изд-во АН СССР. 1958 (в дальнейшем: Френкель, II) с. 126–156.
- [2] Frenkel J. Idem: 1931. Vol. 37. N 10. P. 1276–1294. Перевод: Френкель, П, с. 157–176.
- [3] Гросс Е.Ф., Каррыев Н.А. Поглощение света кристаллом закиси меди в инфракрасной и видимой части спектра // ДАН СССР. 1952. Т. 84. С. 261.
- [4] Каганов М.И., Лифшиц И.М. Экситон Френкеля — квазичастица // В кн.: Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука. 1975 (серия «Классики науки»). С. 582–589.
- [5] Рашба Э.И. Предсказание экситонов: к 90-летию Я.И. Френкеля // УФН. 1984. Т. 144. Вып. 2. С. 347–357.
- [6] Захарченя Б.П. Открытие экситонов в полупроводниках // В сб.: Математическое естествознание в его развитии. Киев: Наукова думка. 1987. С. 78–85.
- [7] Френкель В.Я. Ранняя история квазичастиц // Там же. С. 49–54.
- [8] Гросс Е.Ф. // Экситон и его движение в кристаллической решетке // УФН. Т. 76. Вып. 3 (посвящен памяти Я.И. Френкеля). С. 433–467.
- [9] Каплянский А.А. Экситоны в полупроводниках. Из истории открытия; последние исследования в ФТИ // В кн.: Физика: проблемы, история, люди. Отв. редактор В.М. Тучкевич. Л.: Наука. 1986. С. 5–19.
- [10] Вукс М.Ф., Захарченя Б.П., Каплянский А.А. Очерк жизни и деятельности Е.Ф. Гросса // В кн.: Гросс Е.Ф. Исследования по оптике и спектроскопии кристаллов и жидкостей. Л.: Наука. 1976. С. 5–30.

- [11] Экситоны. Под ред. Э.И. Рашбы и М.Д. Стреджа. М.: Наука. 1985. 616 с.
- [12] Adair R.K., Henley E.M. Physical Review Centenary — from basic research to high technology // *Phys. Today*. 1993. Oct. issue. P. 22–25.
- [13] Френкель Я.И. Волновая механика. Т. I. Л.; М.: ГТТИ. 1933.
- [14] Walcker C.T., Slack G.A. Who names the «ones» // *Am. Journ. Phys.* 1970. Vol. 38. N 12. P. 1380–1389.
- [15] Френкель Я.И. О поглощении света и прилипании электронов и положительных дырок в кристаллических диэлектриках // *ЖЭТФ*. 1936. Т. 6. Вып. 7. С. 514–524. Перепечатано: Френкель, П. С. 182–201.
- [16] Frenkel J. The quantum theory of the absorption of light // *Nature*. 1929. Vol. 124. N 3133. P. 716–717.
- [17] Френкель В.Я. Яков Ильич Френкель. Л.; М.: Наука. 1966.
- [18] Захарченя Б.П. Открытие экситона — теория и эксперимент // *ФТП*. Т. 18. Вып. 11. С. 1940–1942.
- [19] Кожушнер М.А. Экситоны — квазичастицы в твердых телах. М.: Знание. 1973. 64 с.
- [20] Frenkel J. Elementare Theorie magnetischer und elektrischer Eigenschaften der Metalle beim absoluten Nullpunkt der Temperatur // Перевод: Френкель, П. С. 96–109.
- [21] Pauling L. Schrödinger's contribution in chemistry and biology // In: *Schrödinger: Centenary celebration of polymath*. Ed. by C.W. Kolmister. N.Y. e.a.; Cambridge Univ. Press. 1987. P. 225–233.
- [22] Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. N.Y. Springer Verlag. 1985.
- [23] Slater J.C. Solid state and molecular theory. A scientific biography. N.Y. 1975. 357 p.
- [24] Peierls R. Theorie der Absorptionsspektren festen Körper // *Ann. Phys.* 1932. Bd. 13. H. 8.S. 905–952.
- [25] Mott N.F. On the absorption of light by crystals // *Proc. Roy. Soc. London A*. 1938. Vol. 167. N 930. P. 384–391.
- [26] Wannier G.H. The structure of electronic excitation in insulating crystals // *Phys. Rev.* 1937. Vol. 52. N 3. P. 191–197.
- [27] Френкель Я.И. Теоретическая физика в СССР за 30 лет // *УФН*. 1947. Т. 33. Вып. 3. С. 294–317. Перепечатано в кн.: Френкель Я.И. На заре новой физики. Л.: Наука. 1970 (Серия «Популярные произведения классиков естествознания»). С. 306–338.
- [28] Френкель Я.И. Современная теория металлических тел (Первое Курнаковское чтение) // *Вестник АН СССР*. 1946. № 10. С. 61–82. (Перепечатано: *УФН*. 1946. Т. 30. Вып. 1/2. С. 11–39).
- [29] Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. Изд. 2-е М.; Л.: ГТТИ. 1950 (гл. 9 — «Зональная теория твердых диэлектриков» и гл. 10 — «Зональная теория металлов», с. 156–183).
- [30] Я.И. Френкель. Воспоминания, письма, документы. Под ред. В.М. Тучкевича. Л.: Наука. 1986. — Статья С.И. Пекара-с. 197–200.
- [31] Френкель Я.И. Проблемы современной физики // *Вестник АН СССР*. 1943, № 4/5. С. 89–108.
- [32] Давыдов А.С. Теория спектров поглощения молекулярных кристаллов // *ЖЭТФ*. 1948. Т. 18. Вып. 2. С. 210–218.
- [33] Давыдов А.С. История развития низкотемпературной спектроскопии молекулярных кристаллов // В кн.: *Математическое естествознание в его развитии*. Киев: Наукова Думка. 1987. С. 54–67.
- [34] Apker L., Taft E. Photoelectric emission from F-Centers in KI // *Phys. Rev.* 1950. Vol. 79. N 6. P. 964–966.
- [35] Жузе В.П., Рывкин С.М. «Экситонный» характер поглощения света и примесная фотопроводимость // *ДАН СССР*. 1951. Т. 77. № 2. С. 241.
- [36] Гросс Е.Ф., Каррыев. Оптический спектр экситона // *ДАН СССР*. 1952. Т. 84. С. 471.
- [37] Hayashi M. Absorption spectrum of Curpous oxide in the visible region // *J. Faculty Sci. Hokkaido Univ.* 1952. Vol. 4. N 1. P. 107–128.