

Слово об учителе академика Б. П. Захарчени

Виртуоз оптического эксперимента

Евгений Федорович Гросс родился в 1897 году 8 октября в семье инженера-металлурга, управляющего Ижорским заводом — русского дворянина. В старой России это был крупнейший завод по производству вооружения.

Евгения Гросса можно с уверенностью назвать выдающимся физиком-экспериментатором, работавшим в области спектроскопии конденсированного состояния. Его убежденность в могуществе оптики и спектроскопии как инструмента исследования микроскопической структуры вещества была во многом внушена ему его учителем академиком Дмитрием Сергеевичем Рождественским и оставалась с Гроссом до его смерти в 1972 году.

В области спектроскопии Гроссом выполнено много блистательных исследований, но вершинами его творчества являются:

— открытие в 1930 году тонкой структуры линии Рэлея т.н. бриллюэновского рассеяния, доказавшего существование дебаевских волн в кристаллах;

— открытие спектров малых частот при рассеянии света кристаллами. По существу это было наблюдение новых спектральных линий, появляющихся в области крыльев рамановских линий при кристаллизации жидкостей. Соответствующие частоты, получившие название "гроссовских частот", связаны с межмолекулярными колебаниями;

— открытие спектра экситонов большого радиуса в полупроводниках — экситонов Ванье–Мотта. По своей значимости это от-

крытие очень близко к работам, за которые присуждаются Нобелевские премии.

Воспользуюсь случаем, и немного расскажу еще об одном выдающемся открытии Евгения Федоровича, имевшем, увы, драматический финал. О нем мало известно.

Дело в том, что в самом начале своей научной работы Евгений Гросс использовал приборы высокой разрешающей силы. Это был эшелон Майкельсона. Гросс овладел в совершенстве эшеленом и, скрестив его со спектрографом, начал исследование структуры линий излучения в источниках газового разряда, в том числе и в тех, где было устранено доплеровское уширение, т.е. линии были чрезвычайно узки. Используя такую технику, Гросс наблюдал сверхтонкую структуру линий. Такая структура была предсказана к этому времени Вольфгангом Паули как результат взаимодействия спинов электронов с угловым моментом ядра. Сделав выдающееся открытие, Гросс совершил непростительную ошибку, доверившись авторитету одного из старших сотрудников Рождественского, который заявил, что наблюдавшаяся Гроссом структура не что иное как результат тривиального самообобщения резонансных линий в неоднородном по температуре разряде. Гросс изменил условия разряда, и структура исчезла вследствие уширения линий.

После публикаций в 1928 году в журнале *Z. Phys.* немецкими исследователями результатов по сверхтонкому расщеплению линий натрия в соответствии с теорией Паули Гросс понял какую ошибку он совершил, слепо доверившись авторитетному мнению. Он долго переживал свою ошибку, а нас, своих учени-

ков, всегда убеждал критически относиться к авторитетному мнению — быть диссидентами в науке.

В конце 20-х годов Евгений Гросс с энтузиазмом берется за осуществление очень сложного в долазерную эпоху эксперимента по наблюдению тонкой структуры линий Рэля. Этот эксперимент был предложен молодому физику выдающимся московскими оптиками Л. Мандельштамом и Г. Ландсбергом, трагически упустившими в 1928 году приоритет открытия неупругого рассеяния света, которое весь мир теперь называет рамановским, по имени индийского физика, успевшего несколько ранее опубликовать свои эксперименты, хотя и не столь яркие, как у Ландсберга и Мандельштама.

Эксперимент в 30-х годах по наблюдению структуры линий Рэля был невероятно труден прежде всего из-за отсутствия интенсивного источника света с направленным излучением и чувствительного приемника фотонов. У Гросса источником света была ртутная кварцевая лампа, точнее ее линия 2537 \AA , а приемником служила фотопластинка. Рассеивающим объектом был кристалл кварца, выбранный (здесь проявилась настойчивость и дотошность Гросса) из многих сотен образцов. Светосила установки с эшеленом Майкельсона была невелика, поэтому экспозиция составляла сотню часов. Все это время Гросс не отходил от установки, следя за термостатированием и баростатированием эшелона Майкельсона. Эксперимент завершился успехом. Гросс наблюдал структуру линии Рэля, предсказанную Леоном Бриллюэном¹, но она была сложнее вследствие наличия продольных и поперечных акустических мод. В случае кварца в стоксовой и антистоксовой части наблюдалось по три компонента. Эксперимент был настоящим подвигом в то время. Гросс опубликовал его результаты в 1930 году в журнале *Z. Phys.* с выражением глубокой признательности указанным выше московским физикам.

Увы! Спектр и его структуру Гросс мог наблюдать на фотопластинке лишь визуально, методом качающегося объектива, усредняющего

¹ До Бриллюэна эту структуру предсказал Леонид Мандельштам в 1926 году, поэтому мы часто называем этот эффект мандельштам-бриллюэновское рассеяние.

зерно пластинки в области почернения. Снять спектр на микрофотограмму тогда не представлялось возможным, и поэтому он не смог послать результат эксперимента Леону Бриллюэну в ответ на его письменный запрос. В открытие Гросса поверили лишь через три года, когда в одной из лабораторий Франции удалось воспроизвести его эксперимент. Теперь наблюдать рассеяние Мандельштама-Бриллюэна сравнительно просто. Лазерная спектроскопия существенно упростила эксперимент.

Я счел уместным рассказать здесь об этом эксперименте Гросса, так как он показывает не только необычайную выносливость Гросса в экспериментальной работе, но и его жгучее стремление получить новый результат, дающий пищу для дальнейших размышлений.

Эти качества подтвердились в замечательных экспериментах Гросса и Макса Вукса по наблюдению малых частот в рамановских спектрах молекулярных кристаллов, о чем уже говорилось выше.

Теперь обратимся к экситонной части исследований Гросса и его сотрудников. Все началось с того, что вскоре после завершения Второй мировой войны Гросс был приглашен директором Физико-технического института Абрамом Федоровичем Иоффе для организации в институте оптической лаборатории. Любопытно, что уже в 40-х годах Иоффе понимал значимость оптики и спектроскопии для твердого тела и особенно для полупроводников, которыми сам он активно занимался, предвидя их великое будущее. Поначалу Гросс продолжал заниматься рассеянием света, но вскоре он заинтересовался экспериментами В. Жузе и С. Рывкина, обнаружившими, что для объяснения опытов по кинетике фотопроводимости в кристаллах закиси меди приходится привлекать идею экситона, квазичастицы, переносящей энергию, но не заряд, предсказанную еще в 1931 году физтеховским теоретиком Яковом Ильичем Френкелем.

Полупроводниковый кристалл закиси меди в 40-х годах был весьма популярен. Вырастить кристаллы Cu_2O , хотя и не очень совершенные, не представляло труда. Поэтому Гросс решил исследовать их оптические спектры поглощения в надежде обнаружить нечто связанное с экситоном. Судьба приготовила ему пода-

рок. В первом же спектре поглощения тонкой рубиново-красной пластинки закиси меди он вместе со своим аспирантом из Туркмении Нури Каррыевым наблюдал серию узких линий поглощения, сбегающихся по водородоподобному закону к границе сплошного поглощения, соответствующей фундаментальному краю поглощения или, как мы сейчас говорим, переходу зона–зона. При температуре жидкого азота наблюдалось 6–7 линий. Опыт был проведен в начале 1951 года. Гросс объявил на семинаре института, что он наблюдает спектр поглощения квазичастицы экситона. Он вычислил экситонный ридберг и определил, насколько это было возможно, эффективные массы электрона и дырки.

Как хорошо известно, понятие экситона в физику твердого тела было введено творцом многих физических моделей Яковом Френкелем. При вычислении экситонных состояний и волновых функций Френкель использовал приближение Гайтлера–Лондона, считая, что в схеме Блоха, привычной для всех, кто занимается полупроводниками, но основанной на приближении Хартри–Фока, нет места электронным корреляциям. Впоследствии Ванье и Мотт вписали экситонные состояния в привычную для нас блоховскую схему. Именно такой экситон большого радиуса и открыл Гросс.

Экситоны Френкеля, или, как часто их называют, экситоны малого радиуса, были открыты давно. Но экспериментаторы, наблюдавшие их, не осознавали связи тех линий, которые они наблюдают, с экситоном. Это были Жан Беккерель, наблюдавший узкие линии в кристаллах солей редких земель (минералы ксенотим и тизонит), и Иван Обреимов, обнаруживший линейчатые спектры кристаллов ароматических углеводородов (нафталин, антрацен, бензол). Примерно через три десятилетия после этих наблюдений А. Давыдов развил теорию экситонов малого радиуса и сформулировал основной критерий опознавания таких экситонов — знаменитый давыдовский дублет, компоненты которого поляризованы относительно осей кристалла. Однако экспериментаторы упорно называли линейчатые спектры в указанных выше кристаллах спектрами неких кристаллических

состояний. Экситонная терминология появилась лишь после открытия Гросса.

Ближе всего к экситонной идеологии до Гросса были те, кто занимался широкими полосами на краю фундаментального поглощения щелочно-галоидных кристаллов, открытых Хильшем и Полем. Именно в этих кристаллах впервые была доказана миграция экситонов опытами Апкера и Тафта в начале 50-х годов.

Обнаружив необычайно яркое явление и сразу поверив в его экситонную природу, Гросс очень спешил с публикацией. Однако на его пути встретились серьезные препятствия. Дело в том, что как раз в это время Абрам Федорович Иоффе был смещен с поста директора Физико-технического института куратором ядерной программы СССР Лаврентием Берией. Пришел новый директор Антон Комар — украинский академик. Он вынужден был проявлять особую строгость, подписывая в печать статьи сотрудников института, так как незадолго до его прихода одним из сотрудников института был опубликован цикл статей по ядерной физике, получивший Сталинскую премию. Работы оказались ошибочными, и репутация института пострадала. К тому же Комар получил заверение от коллеги по украинской академии наук профессора Антонины Приходько, что наблюдаемая Гроссом серия линий не что иное как тривиальная интерференция света в кристаллической пластинке. Гросс был не просто возмущен. Он был взбешен: "Его, оптика с мировым именем, обвиняют в примитивной ошибке!"

Некомпетентность Комара и Приходько дорого обошлась Гроссу. Открытие, сделанное в начале 1951 года, он смог опубликовать лишь в 1952 году в журнале "Доклады Академии наук", поместив там одну за другой две статьи. Помог в этом Гроссу президент Академии наук СССР А.Н. Несмеянов. В тот промежуток, когда статьи лежали, появились статьи японских физиков Хайяши (Hayashi) и Катсуки (Katsuki). Первая — была опубликована в 1950-м году в J. Phys. Soc. Japan, и пришла к нам годом позже. В ней никакой водородоподобной серии не наблюдалось. Экситонная интерпретация ступенек (не линий), что наблюдались на краю поглощения, отсутствовала. В 1951 году те же авторы опубликовали в журнале университета

Хоккайдо более подробную статью, где уже говорилось о водородоподобной серии, правда, гораздо менее выразительной, чем у Гросса. Об экситоне — ни слова. Эту статью Гросс достал уже после опубликования своих работ с четкими водородоподобными сериями и уверенной их интерпретацией.

Эти статьи японских авторов, по-видимому, не очень внимательно были изучены профессором Рашбой, и в предисловии к редактировавшейся им книге "Экситоны", изданной в 1982 году голландским издательством North-Holland, он приписал открытие экситона японским ученым. Гросс уже умер, но для его многочисленных учеников — Каплянского, Пермогорова, Сафарова, Новикова, автора этого эссе и других — это было непонятно и весьма неприятно, тем более что Эммануила Рашбу мы, как и Гросс, высоко ценим как крупного теоретика.

Еще более неприятным фактом были многочисленные попытки страсбургского профессора Сержа Никитина всячески принизить заслугу Гросса и его неоспоримый приоритет в открытии новой квазичастицы с тем, чтобы, начав аналогичные исследования, присвоить честь открытия себе. Никитин как русский эмигрант хорошо знал язык и пользовался тем, что журналы, где публиковался Гросс, не переводились на английский. Гросса возмущали многие статьи и обзоры Никитина, где легко угадывалась попытка заимствования. В архиве Евгения Федоровича мы нашли письма Никитину с упреками по этому поводу и наивными попытками объяснить, что так поступать крайне непорядочно.

Главным аргументом Гросса в пользу экситонной интерпретации наблюдаемого явления была узость линий. Такое свойство экситонного поглощения отмечалось еще в первых работах Френкеля. Импульс света мал, поэтому он рождает экситон с минимальной энергией в экситонной зоне. Такое утверждение, кажущееся в наши дни тривиальным, было весьма смелым в 30-х годах, когда к существованию квазичастиц в твердом теле относились с большим недоверием. Этот аргумент Гросса плохо воспринимался и в 50-х годах. Большинство оппонентов экситонной интерпретации утверждали, что скорее всего это примесь, не понимая, что

оптические переходы зона-примесь не могут дать узких линий вследствие того, что волновые функции примесных состояний занимают значительную область K -пространства. Такие переходы дают широкие ступеньки поглощения.

Аргумент, связанный с узостью линий, плохо воспринимался семинарскими аудиториями, где мы с Гроссом часто тогда выступали. Яркие эффекты в электрических и магнитных полях, доказывавшие огромный радиус экситонных орбит, заинтересовывали, но как аргумент в пользу существования подвижной квазичастицы, не воспринимались недоверчивыми учеными. Нам говорили: "Докажите движение экситона, тогда поверим".

Первыми экспериментами в этом направлении явились опыты по инверсии магнитного поля, выполненные на кристаллах сульфида кадмия. Опыты по тщательному изучению формы и структуры полос люминесценции в CdS и CdSe, где было доказано максвелловское распределение экситонов по импульсам и, наконец, опыты по пространственной дисперсии экситонов, начиная с наблюдения квадрупольной линии в закиси меди, соответствующей переходу в первое экситонное состояние.

Я затрудняюсь перечислить здесь все открытия в физике экситонов, сделанные за очень короткое время Гроссом и его командой в Физико-техническом институте. Этот период с 50-х по середину 60-х годов я люблю называть, следуя терминологии Гете и Шиллера, периодом "Sturm und Drang" в оптике экситонов в полупроводниках. Следует отметить, что в этих открытиях выдающуюся роль сыграла закись меди — кристалл, где валентная зона и зона проводимости описываются волновыми функциями одинаковой четности. Вследствие этого, коэффициент поглощения для междузонных переходов относительно мал, что дает уникальную возможность наблюдать при температуре жидкого гелия до 13 линий поглощения в экситонной серии! Способствуют этому и другие параметры зонной структуры закиси меди. Это был кристалл Гросса! Разглядывая его спектр, расположенный в видимой области, с помощью простой лупы он вдохновенно вскрикивал: "Какое удивительное явление! Водородоподобная

серия в кристалле! Какие узкие линии! Борис, какая красота, невозможно оторваться! Я уверен, это экситон!”

Наверняка в душе Гросса в такие моменты звучали ликующие тангейзеровские трубы.

За короткое время были открыты: вторая экситонная серия, связанная со спин-орбитальным расщеплением (это до опытов по циклотронному резонансу); диамагнитный сдвиг экситона и зееман-эффект экситонных линий; штарк-эффект экситона и ионизация экситона в слабых полях; диамагнитные экситоны (магнитные экситоны); уже упоминавшаяся поляризация квадрупольной экситонной линии; в кристаллах $A^{II}B^{VI}$ ученики Гросса обнаружили горячие экситоны; исследовали эффект инверсии магнитного поля; открыли оптический аналог эффекта Мессбауэра; обнаружили спектры экситонно-примесных комплексов; тонкую структуру фотопроводимости, связанную с экситонными состояниями; начали эксперименты по созданию экситонного газа большой плотности. Всего не перечислить.

Было ясно, что открытие экситонов положило начало спектроскопии полупроводников, которая сыграет в изучении электронных состояний в полупроводниках такую же роль, как атомная спектроскопия в эпоху великих открытий квантовой механики. Об этом часто говорил Абрам Федорович Иоффе, комментируя выступления Гросса и его сотрудников.

Изобретение лазеров и их появление в практике лабораторного эксперимента привело к открытию многоэкситонных комплексов, поставило задачу создания бозе-конденсата, родившую физику электронно-дырочной жидкости в полупроводниках. Появились многочисленные эксперименты по оптической ориентации и выстраиванию экситонов. Наконец, блистательные работы по экситонной физике были выполнены с помощью фемтосекундной техники.

Невозможно представить спектроскопию квантоворазмерных структур без изучения экситонных состояний. Здесь наблюдалось очень много тонких явлений от квантовых биений, вследствие интерференции квантовых

состояний, до эффектов антикроссинга уровней тонкой структуры локализованных состояний экситона. Обнаружение триона и явлений, связанных с shake-up процессом, я думаю, далеко не завершают гигантскую пирамиду этих исследований.

В заключение я хотел бы вернуться еще к личности моего учителя Евгения Федоровича Гросса, заложившего основание этой пирамиды.

Кроме поразительной физической интуиции, природа одарила его утонченным пониманием музыки и живописи. Он был настоящим музыкальным ”тиффози”, не пропускающим ни одного сколько-нибудь значительного музыкального события в Петербурге–Ленинграде. Помню его рассказы о счастливом и достаточно богатом детстве, когда отец надевал на него теплейший романовский полушубок, усаживал, в сани и тройка везла его в Петербург к Дворянскому собранию (ныне Филармония). Нам трудно представить тот далекий снежный Петербург, когда на санях можно было из пригорода (особняк Гроссов был в Колпино) доехать в самый центр города. В концертном зале — любимый Александр Зилоти со своими просветительскими концертами и лекциями или восьмилетний вундеркинд Вилли Ферреро, подчиняющий своей дирижерской палочке огромный оркестр.

Больше всего Гросс любил Сергея Прокофьева, а менее всего Чайковского и Мендельсона, считая их слишком программными и приземленными.

Из исполнителей любимыми были Святослав Рихтер и, конечно, великий Глен Гульд, концерты которого в Ленинграде Гросс считал крупным событием своей жизни.

Я часами могу рассказывать об увлеченности Гросса живописью: от золотисто-голубого Пуссена до абстракций Кандинского и гениальных цветовых находок ученика Петрова-Водкина Чупятова (в небольшой коллекции Гросса он хорошо представлен).

Однако остановимся и попросим моего молодого друга скрипача Бориса Кипнеса вспомнить Гросса замечательной музыкой Баха.