

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Предсказание и обнаружение тонкой структуры линии Рэлея

И.Л. Фабелинский

История теоретического предсказания и экспериментального открытия одного из важнейших явлений в оптике и в физике конденсированных сред — обнаружения тонкой структуры линии Рэлея, а также история публикаций первых статей по этой теме.

PACS numbers: 01.65.+g, 33.20.-t

Содержание

1. Введение (93).
 2. О спектре света молекулярного рассеяния (94).
 3. Начало экспериментальных исследований с целью обнаружения тонкой структуры линии Рэлея (98).
 4. Начало параллельной работы в МГУ и ГОИ по обнаружению тонкой структуры линии Рэлея (99).
 5. Результаты первых опытов Г.С. Ландсберга и Л.И. Мандельштама и Е.Ф. Гросса, изложенные ими самими (102).
 6. Некоторые сомнения и недоумения (104).
 7. Тонкая структура спектра света, рассеянного в жидкостях (106).
- Список литературы (107).

1. Введение

Изучением рассеяния света занимались давно во многих странах мира, и эти работы дали много выдающихся результатов.

Особенно интересны исследования, знаменующие собой поиски и находки спектрального состава света, рассеянного в разных средах. Оказалось, что спектр рассеянного света связан с такими физическими явлениями, которые на первый взгляд не имеют никакого отношения к рассеянию света. В этой области было обнаружено много нового, неожиданного, красивого и очень значительного для физики вообще.

Недаром на одном из своих замечательных семинаров 20 декабря 1939 г. на физическом факультете Московского университета Л.И. Мандельштам [1] сказал: "Еще совсем недавно весь комплекс вопросов, связанных с рассеянием света, был неясен. Обидно, что Вам не известен весь генезис этого вопроса. Речь идет об истории самого последнего времени, и актуальность этого генезиса еще очень велика. Все происходило на моих глазах. Несомненно, это одна из интереснейших страниц истории физики".

И.Л. Фабелинский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 117924 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
Тел. (095) 135-24-11, 132-63-05

Статья поступила 28 апреля 1999 г.

Эти слова принадлежат не просто внимательному наблюдателю, но в первую очередь активному творцу в этой и не только в этой области физики.

В спектроскопии молекулярного рассеяния света ему принадлежат исключительно яркие явления — комбинационное рассеяние света (раман-эффект), предсказание и исследование тонкой структуры линии Рэлея, селективное (резонансное) рассеяние в парах — все эти работы выполнены вместе с Г.С. Ландсбергом. Еще раньше Мандельштам дал теорию и выполнил труднейший эксперимент по рассеянию света вследствие флуктуационных "шероховатостей свободной поверхности жидкости"¹ [2], развил теорию оптического изображения, построил теорию "Излучения источника света, находящегося очень близко от границы раздела двух прозрачных сред" и произвел чрезвычайно тонкие опыты, относящиеся к этой задаче [2].

Л.И. Мандельштам был не только выдающимся теоретиком, но и очень тонким экспериментатором и инженером, работавшим в самых разных областях физики. Цитированное выше высказывание Л.И. Мандельштама [1] сделано 60 лет тому назад.

Теперь многое выяснено, но нерешенных вопросов все еще много и исследования продолжают.

Как возник вопрос о молекулярном рассеянии света и как он развивался, достигнув современного уровня (генезис), представляет собой интересную, почти детективную историю, о которой здесь можно сказать в самых общих чертах.

Под молекулярным рассеянием света обычно понимают рассеяние света на таких флуктуациях физических величин, которые ведут к оптической неоднородности. Впервые на такую роль флуктуаций в процессе рассеяния

¹ Интересно отметить, что, когда работа Мандельштама [2] была опубликована (1913 г.), ее содержание доложил на коллоквиуме А. Эйнштейн. После семинара А. Эйнштейн послал Мандельштаму открытку следующего содержания (по штемпелю 23.07.1913 г.):

"Дорогой г-н Мандельштам.

Я только что доложил на коллоквиуме о Вашей красивой работе по флуктуациям поверхности, о которой ранее мне сказал Эренфест. Сожалею, что Вас лично тут нет.

С наилучшими приветами Ваш А. Эйнштейн".

(На открытке много подписей участников семинара.)

света указал Смолуховский [3], когда он дал правильное, физическое объяснение эффекту критической опалесценции, возникающей при фазовых переходах.

Вот как Эйнштейн [4] описывает сложившееся здесь положение:

"Если же работа, необходимая для того, чтобы в объемах жидкости с линейными размерами порядка длины волны создать заметные отклонения от средней плотности или от среднего состава смеси, будет мала, то, очевидно, должно происходить явление опалесценции (явление Тиндала).

Смолуховский показал, что вблизи критического состояния это условие действительно выполняется; однако он не вычислял количество света, рассеянного вследствие опалесценции. Этот пробел должен быть восполнен ниже".

В своей обстоятельной работе Эйнштейн [4] дает способ расчета флуктуаций плотности в жидкости и концентрации в растворах. Метод, впервые примененный Эйнштейном, пригоден для расчета любых термодинамических флуктуаций и применяется до сих пор. В этой же работе Эйнштейн вычислил и интенсивность света, рассеянного на флуктуациях "почти однородной непоглащающей средой". Флуктуация разлагается в трехмерный тригонометрический ряд, амплитуды гармоник вычисляются с использованием принципа Больцмана.

Тригонометрические фурье-составляющие флуктуаций давления, например, представляют собой акустические "волны", но в теории Эйнштейна это статические члены ряда Фурье, а само разложение не более чем вычислительный прием.

Тремя годами раньше Эйнштейн [5] сделал принципиально новый шаг в совершенно другой области физики. До этого шага теплоемкость твердого тела при постоянном объеме C_V определялась законом Дюлонга и Пти, который обосновывался кинетической теорией материи, принимающей равномерное распределение энергии по степеням свободы (kT — на каждую степень свободы для осциллятора). Такой расчет теплоемкости не дает хорошего согласия теории с опытом, особенно при низких температурах. Идея Эйнштейна [5] состоит в том, что на каждую степень свободы приходится энергия не kT , а $h\nu[\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1}$, где h — постоянная Планка, а ν — частота упругих колебаний частиц, составляющих тело. В этой теории рассчитанная величина C_V гораздо лучше согласуется с температурной зависимостью C_V , измеренной на опыте. Но при низких температурах согласие теории с опытом все еще требует лучшего. Эйнштейн [5] понимает, что одна частота для всех осцилляторов — это упрощение, но дальше эту теорию не развивает и упругие частоты здесь никак не связывает с фурье-компонентами, введенными при расчете интенсивности рассеянного света.

Мандельштам [2] в своей теории флуктуационной шероховатости свободной поверхности жидкости разлагает флуктуации в двумерный ряд Фурье и рассчитывает интенсивность рассеянного света как отражение от двумерной "решетки". Но и здесь ничего не сказано о теплоемкости твердого тела.

Дальнейшее развитие теории теплоемкости твердого тела принадлежит Дебаю. У Дебая [6] красивая идея. Твердое аморфное тело рассматривается как континуум, тогда его колебания определяются из уравнений

теории упругости с соответствующими граничными условиями [7, 8].

Общее число нормальных колебаний с частотами, заключенными в интервале от Ω до $\Omega + d\Omega$, равно

$$dZ(\Omega) = \frac{3\Omega^2 d\Omega}{2\pi^2 V^3} \Phi, \quad (1)$$

где V — средняя скорость упругих волн в твердом аморфном теле: $3/V^3 = 2/V_t^3 + 1/V_l^3$ (здесь V_t и V_l — скорости поперечных и продольных упругих волн соответственно), а Φ — объем изучаемого тела.

В теории Дебая [6] твердое тело, как сказано, считается непрерывным, но число точечных излучателей, составляющих тело, принимается конечным и равным N , а число степеней свободы равным $3N$. Тем самым максимальная частота Ω_{\max} не равна бесконечности, но определяется из условия

$$Z(\Omega_{\max}) = \int_0^{\Omega_{\max}} dZ(\Omega) = \Phi \frac{\Omega_{\max}^3}{2\pi^2 V^3} = 3N. \quad (2)$$

Полагая, что тело состоит из точечных частиц и обозначая расстояние между частицами через d , следует положить, что $\Phi/N = d^3$. Тогда

$$\Omega_{\max} = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/3} \frac{2\pi V}{d}, \quad (3)$$

$$A_{\min} = \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{1/3} d. \quad (4)$$

Оценка дает, что $\Omega_{\max} \cong 10^{14}$ Гц, $A_{\min} \cong 1,5$ А.

Теория Дебая [6] приводит к закону $C_V \sim T^3$, где T — абсолютная температура. В теории Дебая [6] уже совершенно ясно, что речь идет об упругих колебаниях твердого тела, причем частоты этих колебаний занимают интервал от 0 до $\Omega_{\max} \equiv 2\pi f_{\max} \sim 10^{14}$ Гц, а их волновые векторы имеют самые разные направления внутри образца. Интерференция этих волн дает те оптические неоднородности, которые мы называем флуктуациями.

2. О спектре света молекулярного рассеяния

Почему Эйнштейн [4] и Мандельштам [2], занимаясь проблемой светорассеяния и разлагая флуктуации на гармонические составляющие, ничего не говорят о проблеме теплоемкости и почему Эйнштейн и Дебай, занимаясь проблемой теплоемкости, вводят упругие волны и ничего не говорят о рассеянии света? Вероятно, в то, уже теперь далекое, время понять, что Эйнштейновские и мандельштамовские фурье-компоненты и дебаевские упругие волны — это одно и то же, было не так легко.

Кто первый понял, что во всех случаях, упомянутых выше, речь идет о тепловых упругих волнах, сказать невозможно, но, думаю, есть основания предположить, что эта мысль пришла в голову тому или тем, кто этой проблемой занимался. Если это сокращает круг возможных имен физиков, то из названных выше физиков выбрать нетрудно.

Автор настоящей статьи отдает себе отчет в том, что его рассуждения могут оказаться ошибочными, но

приводит их потому, что они могут оказаться и правильными, хотя считает их не более чем догадкой².

Л.И. Мандельштам, занявший кафедру теоретической физики на физическом факультете Московского университета в 1925 г., поставил экспериментальную задачу — обнаружить в спектре рассеянного света изменение частоты, обусловленное модуляцией рассеянного света упругими тепловыми волнами.

Эксперимент, направленный на обнаружение предсказанного эффекта, Л.И. Мандельштам осуществлял вместе с Г.С. Ландсбергом, который в то время уже работал на физическом факультете МГУ (теперь им. М.В. Ломоносова). Ясно, что идея о модуляции световых волн рассеянного света тепловыми упругими волнами пришла Мандельштаму в голову раньше 1925 г. Но указать в точности, когда именно, теперь трудно.

Однако есть высказывания людей, близких Л.И. Мандельштаму, таких как Н.Д. Папалекси и Г.С. Ландсберг. Так, Н.Д. Папалекси, написавший биографию Л.И. Мандельштама в книге [9], по интересующему нас вопросу пишет: "Размышляя над вопросами рассеяния света, Л.И. уже в 1919–1920 гг. пришел к заключению, что в совершенно свободном от посторонних примесей однородном теле в силу тепловых флуктуаций должно наблюдаться не только рэлеевское рассеяние света, но и спектр рассеянного света должен претерпевать изменения, правда очень незначительные".

Г.С. Ландсберг [10, 11] в своем анализе обстоятельств, приведших Л.И. Мандельштама к заключению, что в спектре света, рассеянного конденсированной средой, должно наблюдаться изменение частоты рассеянного света, называет приблизительно тот же период времени, что и Папалекси: "Процессы возникновения и рассасывания флуктуаций происходят, вообще говоря, беспорядочно. Но теоретическое рассмотрение этих процессов позволяет установить важные закономерности общего характера.

Такого рода рассмотрение было выполнено Л.И. Мандельштамом еще в 1918 г., хотя соответствующая заметка (о рассеянии света неоднородной средой [12]) появилась значительно позже, в 1926 г., когда часть найденных Л.И. Мандельштамом результатов была уже опубликована Л. Бриллюэном (1922)" [13].

В цитированных выше высказываниях Папалекси и Ландсберга речь идет приблизительно об одном и том же

времени — 1918–1919 гг. Здесь называется то время, когда Л.И. Мандельштам уже обсуждал со своими коллегами возможные изменения в спектре рассеянного света. Насколько могу судить, Л.И. Мандельштам мог обсуждать новую физическую задачу и, возможно, новое физическое явление только после того, как в его сознании эта постановка вопроса созрела и была для него ясна.

Вопрос о том, как в сознании человека возникает идея, ведущая к новому, чрезвычайно сложен и вряд ли поддается объяснению вообще. Но в некоторых случаях можно догадаться или лучше сказать пофантазировать и построить для себя приемлемую схему того, как человек пришел к правильному решению. Теперь интересно представить себе, как Л.И. Мандельштам [12] и упомянутый выше Г.С. Ландсбергом Леон Бриллюэн [13] пришли к выводу и даже обосновали это количественно, что должна существовать тонкая структура линии Рэлея или то явление в спектре рассеянного света, которое теперь называется линиями Мандельштама–Бриллюэна.

Л.И. Мандельштам после своей Страсбургской диссертации об определении периода колебания разряда конденсатора (1902 г.) печатает обширное исследование "К теории передатчика Брауна" [14]. Оставляя в стороне все сложности, связанные с теорией такого не простого предмета, укажем только на принципиальную особенность любого передатчика. Для того чтобы что-то передать, нужно несущую волну, излучаемую передатчиком, модулировать либо акустическими частотами голоса, музыки и т.п., либо каким-то другим путем, но непременно модулировать.

Всякому, кто работает или занимается в этой области, ясно, что модуляция несущей частоты дает дополнительные частоты (боковые частоты) в излучении передатчика. Как теперь хорошо известно, компоненты Мандельштама–Бриллюэна — это и есть боковые частоты, появившиеся в результате модуляции электромагнитной волны рассеянного света упругими тепловыми волнами.

Но работа Мандельштама [14] появилась в 1904 г. — это слишком рано, чтобы стать стимулом к предсказанию тонкой структуры линии Рэлея. Работа Эйнштейна по теории теплоемкости твердого тела опубликована в 1907 г. [5]. В этой работе применена формула Планка не для фотонов, а для упругих колебаний и, следовательно, там присутствует частота упругих колебаний, но, как сказано, там нет ни слова о спектре рассеянного света.

Полагаю, что Эйнштейн просто не думал о спектре рассеянного света. В работе [4] он дал способ расчета флуктуаций методом статистической теории и получил формулу, выражающую интенсивность света, рассеянного на таких флуктуациях. Эти результаты Эйнштейна вошли в арсенал статистической физики как крупнейшие достижения. Отметим также, что Мандельштам [2] на основании общего принципа, сформулированного Эйнштейном [4], рассчитал интенсивность света, рассеянного флуктуационно-шероховатой поверхностью. И даже более того, он произвел опыты, подтвердившие выводы теории [2].

В теории теплоемкости твердого тела Дебая [6] уже присутствуют упругие тепловые волны с самыми разными частотами, ограниченными только максимальной частотой. Но и здесь Дебай не подумал о спектре рассеянного света.

² Моя догадка, возможно, находит некоторое подкрепление в общих высказываниях Л.И. Мандельштама, сделанных им в "Лекциях по некоторым вопросам теории колебаний" [1], прочитанных на физическом факультете Московского университета в год своей кончины (1944 г.). Л.И. Мандельштам отмечает, что деление физики на акустику, оптику и т.п. делается, очевидно, "по принципу физических явлений, которые мы одинаково воспринимаем". И далее: "С колебаниями дело обстоит принципиально иначе: мы выделяем их не по физическому содержанию нашего восприятия, а по общности метода или подхода к изучению, по общности формы закономерностей, независимо от физического содержания, или, вернее, при крайне разнообразном физическом содержании. Здесь охвачены и акустические, и электрические, и оптические явления, которые чрезвычайно различны для нашего восприятия. Именно это обстоятельство придает учению о колебаниях его громадное значение, его интерес. Изучая одну область, Вы получаете тем самым интуицию и знания в совсем другой области. Вы получаете возможность проводить далеко идущие аналогии: темные места, скажем, в оптике, освещаются, как прожектором, при изучении колебаний в механике и т.д."

Насколько можно судить, только Мандельштам [12] и Бриллюэн [13] обратили внимание на то, что реальные дебаевские волны могут модулировать рассеянный свет и дать "боковые частоты" или тонкую структуру линии Рэлея.

Выше уже было сказано, что Мандельштам, разрабатывая вопросы радиопередатчика и многие другие вопросы с этим связанные, мог сразу подумать об аналогии и перенести мысленно то, что наблюдается в радиофизике, в оптику. Если это было действительно так, то перед мысленным взором Мандельштама представилась прекрасная картина спектра света, рассеянного в среде в виде тонкой структуры.

Вот почему, как только Мандельштам возглавил кафедру на физическом факультете Московского университета в 1925 г., он сразу сформулировал задачу обнаружить тонкую структуру в опыте. И не торопясь в 1926 г. опубликовал теорию в журнале, не очень популярном на Западе [12]. В этой работе была поставлена следующая задача: "Настоящая заметка посвящена вопросу об изменении во времени фраунгоферовой дифракционной картины, возникающей при прохождении плоской световой волны через среду слегка оптически-неоднородную для случаев, когда неоднородности вызываются распространяющимися упругими возмущениями, либо когда среда состоит из различных компонент и неоднородность обусловливается различиями концентрации, выравнивающейся диффузией, либо, наконец, для случая непостоянной температуры, выравнивающейся теплопроводностью".

В краткой статье объемом не полных шесть страниц Мандельштам дает полное, достаточно строгое решение вопроса о спектре молекулярного рассеяния света в изотропной среде, обусловленном флуктуациями плотности (давления), температуры (энтропии) и для растворов флуктуациями концентрации. В излагаемом исследовании принято во внимание, что флуктуация давления изменяется, следуя волновому уравнению, а флуктуации температуры и концентрации, следуя уравнению диффузии. Получены количественные значения интенсивности в каждом случае и их частотная зависимость.

Для спектра света, рассеянного вследствие флуктуации плотности (давления), Мандельштамом [12] получено выражение (в его обозначениях) следующего вида:

$$\frac{\delta v}{v} = 2 \frac{a}{c} \sin \frac{\theta}{2}. \quad (5)$$

Далее Мандельштам говорит, что "Рассеянный, в каком-нибудь отличном от направления падающей монохроматической волны, свет состоит из дублета: частота (циклическая) каждой компоненты отличается от частоты падающей волны на величину δv , а $\delta v/v$ зависит опять-таки исключительно от a/c и от угла θ ". (Здесь a — скорость звука, а θ — угол рассеяния.)

Далее сказано, имея в виду (5): "Мы имеем, очевидно, дело с особым видом принципа Доплера". В конце этой фразы есть сноска, в которой сделано замечание: "В своей работе (ссылка на [13]. — И.Ф.) Бриллюэн (Brillouin) также рассматривает вопрос о рассеянии света звуковыми волнами. В ней, между прочим, есть указание на явление Доплера".

Уже несколько раз упоминавшаяся работа [13] представляет собой обширную, детальную, в основном, расчетную работу, занимающую 35 страниц журнала.

Работа эта, как мне представляется, стимулирована работой Дебая [6], который энергию теплового движения в сплошном теле рассмотрел как энергию упругих волн всевозможной частоты от нуля до некоторой предельной частоты, указанной выше (см. (3)).

Бриллюэн сам следующим образом формулирует свою задачу: "В частности, если мы предположим, как это будет сделано ниже, что через прозрачную среду проходят бесконечные волны упругости всех частот во всех направлениях, но свет, рассеянный в направлении, составляющем угол θ с падающим лучом, произойдет только от волны упругости, распространяющейся по биссектрисе угла θ , с длиной волны, определяемой (18)". Формула (18) в [13] выражает условие Брегга, т.е.

$$2An \sin \frac{\theta}{2} = \lambda, \quad (6)$$

где A , λ , n — длина упругой волны, длина волны света и показатель преломления соответственно.

Если говорить кратко и суммарно, то отражение света от бегущей со скоростью a упругой волны (от сгущения или разряжения) приведет к изменению частоты вследствие эффекта Доплера в точности такое же, как это выражено формулой (5).

Следует отметить, что поскольку количество волн очень велико, то, если есть волна с волновым вектором q , то всегда найдется волна с волновым вектором $-q$ и, следовательно, образуется стоячая волна, которая будет модулировать рассеянный свет, причем (это специально обсуждалось Ландсбергом [15]) смещение частоты вследствие модуляции будет в точности такое, как это дает формула (5).

Доплеровский сдвиг частоты, полученный Бриллюэном [13], пожалуй, самое ценное, что есть в его работе. Кроме доплеровского смещения частоты в рассеянном свете, в [13] также выводятся формулы для интенсивности рассеянного света с использованием квантовой формулы Планка. Таким образом, полученные в [13] формулы для интенсивности рассеянного света пригодны и для низких температур, и для высоких частот света (рентгеновские лучи), и автор [13] на эти последние результаты обращает основное внимание и уделяет этим вопросам почти весь объем статьи.

Между тем, как показывают оценки [8], формула Эйнштейна для интенсивности рассеянного света и другие подобные формулы, не учитывающие квантовых поправок, справедливы до температур $T \cong 0,1$ К. Поэтому квантовые поправки могут потребоваться только в каком-то экзотическом случае.

Что касается применения формул [13] к рассеянию рентгеновских лучей, то на их рассеяние флуктуационные неоднородности вряд ли окажут заметное влияние. В частности, Дебай и Сирс [16] говорят по этому поводу следующее: "Свои теоретические расчеты он (Бриллюэн. — И.Ф.) пытается применить к рассеянию рентгеновских лучей. Теперь мы знаем, что такой подход далек от правильного, поскольку для таких коротких волн изменения электронной плотности, обусловленные атомной или молекулярной структурой, гораздо важнее тепловых флуктуаций".

Следовательно, вводить в формулу для интенсивности рассеянного света квантовые поправки, существен-

³ В работе [3] угол рассеяния обозначен через 2θ .

ные для низких температур и высоких частот, таких, какие имеют рентгеновские лучи, вряд ли имеет смысл.

Предсказание возможности наблюдать в спектре света молекулярного рассеяния дублет существенно. Как было рассказано выше, Мандельштам [12] пришел к предсказанию названного выше дублета в спектре молекулярного рассеяния света, если поверить в фантазию автора этой статьи, по аналогии с радиофизическими модуляциями несущей частоты передатчика, ведущей к возникновению боковых частот.

Когда речь идет о таком же предсказании Бриллюэна, то любопытно спросить себя, а что его стимулировало. Естественно, речь может касаться только того, что лежит на поверхности и бросается в глаза.

Леон Бриллюэн в возрасте 80 лет скончался в начале октября 1969 г. в Нью-Йорке. А. Кастлер посвятил его памяти лекцию "Жизнь и творчество Леона Бриллюэна", текст которой опубликован в русском переводе в УФН [17]. В лекции Кастлера рассказано, что Бриллюэн, окончив в 1912 г. университет со степенью "аграже" (примерно то же, что кандидат наук), имел счастье провести год в Мюнхене, работая у А. Зоммерфельда, который был во главе Института теоретической физики и у которого также работал молодой М. Лауэ, выдвинувший замечательную идею о том, что если рентгеновские лучи есть короткие электромагнитные волны, то для них кристаллическая решетка твердого тела будет дифракционной решеткой и, следовательно, можно наблюдать явление дифракции рентгеновских лучей. Этой идеей заинтересовались в Институте экспериментальной физики, которым тогда руководил В. Рентген. В институте Рентгена идея Лауэ была реализована тогда же в опыте. Атмосфера и размах теоретического и экспериментального исследования повлияла и на дальнейшие работы Бриллюэна.

А. Кастлер говорит следующее о периоде после возвращения Бриллюэна из Мюнхенского университета: "С момента своего возвращения в Париж, в июне 1913 г., он принялся за диссертационную работу, которая должна была называться "Теория твердых тел и кванты", работу, которой суждено было быть прерванной из-за войны, разразившейся в 1914 г. Он был призван в армию, затем стал лейтенантом армейской радиослужбы и работал с Анри Абрагамом, Морисом и Луи де Бройлями в лаборатории генерала Ферье над улучшением телеграфной связи и изобретением усилителей на сопротивлении...".

Далее Кастлер отмечает: "После защиты диссертации в 1920 г. на протяжении десяти лет, с 1921 по 1931 гг., Леон Бриллюэн читает лекции по радиофизике в Высшей электротехнической школе".

Из сказанного можно заключить, что из названных выше физиков только Мандельштам [14] и Бриллюэн [17] занимались вопросами радиофизики, и, как это отмечалось раньше, между модуляцией несущей частоты в радиопередатчике и модуляцией рассеянного света упругими тепловыми волнами есть прямая аналогия. Поэтому естественно предположить, что эта аналогия стимулировала их предсказания.

Выходит, что те, кто занимался вопросами радиофизики, узнав о дебаевских упругих волнах, сразу, а может быть и не сразу, но поняли, что должна существовать тонкая структура линии Рэлея. Кроме Эйнштейна, Мандельштама и Бриллюэна вопросами молекулярного

рассеяния света в то время занимались также Кабанн во Франции, Ганс в Германии, Стретт (мл.) в Англии, Раман в Индии, Вуд в Соединенных Штатах Америки, но, насколько известно, никто из них не предсказал возможного обнаружения тонкой структуры линии Рэлея, но и вопросами радиофизики, насколько известно, они также не занимались.

Возможно, что моя гипотеза о роли радиофизической аналогии неправильна и все дело в случае. Возможно. Но мне представляется, что случайность здесь маловероятна.

Что касается Эйнштейна, то представляется, что он мог все, но его ум был занят другими великими делами, которые с таким блеском были осуществлены. После фундаментальной работы 1910 г. Эйнштейн [4] к проблеме рассеяния света не обращался.

Представляется, что иначе дело обстоит с Дебаем, который сделал для всех явными тепловые упругие или дебаевские волны, существующие в любом теле, пока абсолютная температура тела отлична от нуля. Он не обратил внимание на рассеяние света на этих волнах и на их особенность. Когда в 1922 г. появилась статья Бриллюэна [13], она, по-видимому, стимулировала работу Дебая и Сирса [16] по дифракции света на ультразвуке.

Сам Дебай [18] следующим образом описывает сложившуюся ситуацию: "Некоторое время тому назад мы вместе с Ф.У. Сирсом сумели показать, что жидкость, через которую распространяются высокочастотные звуковые волны, сильно рассеивает проходящий через нее свет. Более того, здесь наблюдаются интерференционные явления, совершенно аналогичные тем, которые происходят с обычными штриховыми дифракционными решетками, и длина звуковой волны в жидкости играет ту же роль, что и постоянная решетки в штриховой дифракционной решетке".

Одновременно с Дебаем и Сирсом [16] дифракцию света на ультразвуке наблюдали Люка и Бикар [19], а детальная теория этого явления была дана Рытовым [20].

Следует подчеркнуть, что все изменения и особенности в спектре молекулярного рассеяния света могут вызываться только эффектом Доплера и модуляцией рассеянного света. Модуляция играет роль во многих случаях и разделах физики и техники, а ее общая теория дана Рытовым [21] и Харкевичем [22]. В рассматриваемом случае модуляция рассеянного света осуществляется тепловыми упругими волнами синусоидального характера и очень малой амплитудой.

Оценка амплитуды тепловой упругой волны, выполненная в [23], дает для эффективной амплитуды A_{eff} волны следующий результат:

$$A_{\text{eff}} = \left(\frac{kT d\Omega}{\rho \pi^2 V^3} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Принимая для $d\Omega$ величину полуширины линии Мандельштама – Бриллюэна, получим, например, для бензола $A_{\text{eff}} \cong 10^{-11}$ см.

Здесь следует отметить, что тепловая упругая волна, о которой шла речь выше, существенно отличается от искусственной акустической волны, генерируемой, например, пьезоизлучателем. Если эта последняя, распространяясь в среде, затухает во времени и в пространстве, то тепловая упругая волна не затухает ни во

времени, ни в пространстве [23, 24], а ее амплитуда остается постоянной и зависящей только от корня квадратного из отношения абсолютной температуры к кубу скорости звука (7). Это в одинаковой мере относится к кристаллам и жидкостям.

Теория явления показывает, однако, что по ширине и положению компонент Мандельштама–Бриллюэна могут быть определены скорость и поглощение звука соответствующей частоты вплоть до Ω_{\max} [8, 23, 24].

3. Начало экспериментальных исследований с целью обнаружения тонкой структуры линии Рэлея

В Москве Л.И. Мандельштам вместе с Г.С. Ландсбергом приступили к экспериментальному исследованию спектра рассеянного света. В первую очередь нужно было создать установку и выбрать подходящий объект исследования. У исследователей были основания раньше всего изучить твердое тело.

Лучшие образцы природных кристаллов можно было в первую очередь искать среди монокристаллов кварца. Это была в те времена задача не простая, но о ней мне уже приходилось писать и даже несколько раз [25, 26].

Образцы монокристалла кварца были подобраны и работу можно было начинать. Ландсберг [27] в своей первой публикации "Молекулярное рассеяние света в твердых телах" пишет о положении в этой области следующим образом: "Рассеяние же света в твердых телах экспериментально очень мало исследовано. В коротком сообщении Стретт [28] описывает некоторые наблюдения по рассеянию света в кристаллическом кварце и высказывает предположение, что наблюдаемый эффект обусловлен посторонними примесями".

Таким образом, к тому времени, когда Ландсберг приступал к своей работе, не было достоверно известно, можно ли вообще наблюдать молекулярное рассеяние в кристаллах.

Создание нужной установки и исследование рассеяния света в кристаллах пошло для того времени необыкновенно быстрыми темпами. Уже в 1927 г. Ландсберг [27, 29] публикует две статьи в одном из самых популярных западных журналов, где он с полной определенностью доказывает, что молекулярное рассеяние в кристалле кварца существует и его можно изучать. Он находит критерий, позволивший отделить паразитное рассеяние на посторонних включениях от молекулярного рассеяния света.

Эти работы доказали, что можно приступать к основной задаче — обнаружить тонкую структуру линии Рэлея.

Одновременно продолжается изучение рассеяния в кварце совместно с К.С. Вульфсоном [30] и в каменной соли совместно с С.Л. Мандельштамом (мл.) [31].

Вызывает восхищение то, как эта маленькая оптическая лаборатория за не полных пять лет дала так много выдающихся открытий, вошедших в арсенал современной науки.

Первоначально в лаборатории работало два человека. Это были Л.И. Мандельштам, который заведовал кафедрой теоретической физики и имел много других забот, и Г.С. Ландсберг, который в начале их совместной деятельности занимался поисками образцов кристаллов кварца, пригодных для работы.

Отметим, что, когда Л.И. Мандельштам переехал в Москву и начал свою работу на физическом факультете МГУ, вокруг него образовалась группа физиков, как пишет В.А. Фабрикант [32], "... более старшего поколения Г.С. Ландсберг и И.Е. Тамм, так и молодежь А.А. Андронов, А.А. Витт, М.А. Леонтович и С.Э. Хайкин". Сам В.А. Фабрикант познакомился с Г.С. Ландсбергом только в 1928 г., а М.А. Леонтович с 1920 по 1925 гг. работал в институте П.П. Лазарева по изучению Курской магнитной аномалии и, по-видимому, с 1925 г. он присоединился к работам Л.И. Мандельштама и Г.С. Ландсберга, будучи аспирантом Л.И. Мандельштама.

Однако М.А. Леонтовичу приходилось заниматься и лаборантской работой. Вот как он сам вспоминает об этом периоде работы в лаборатории: "Я еще могу вспомнить, как мы дежурили по очереди у ртутной лампы. Снимки продолжались неделями, и нужно было приходить и подкручивать ртутную лампу, чтобы она горела в режиме. Заряжать кассету и проявлять снимки нужно было в полной темноте. На этой почве у меня были ужасные неприятности с Г.С. Ландсбергом. Он был очень деликатный человек. Когда он хотел выразить свое неодобрение, он становился преувеличенно вежливым и деликатным и это было хуже самой скверной ругани. Так я заслужил такое взыскание, когда однажды, заряжая пластинку на недельный снимок, поставил ее не той стороной, как нужно" [33].

О том же времени работы вспоминает и сын Л.И. Мандельштама Сергей Леонидович: "Я помню также, что получение спектра КРС требовало очень длительных экспозиций, и было необходимо в течение всего времени экспозиции поддерживать горение ртутной лампы. Этим, в частности, ночью занималась моя мать. Мы жили тогда в Физическом институте МГУ на Моховой, и дверь нашей квартиры выходила непосредственно в лабораторию, где шел эксперимент.

Сильно задержало работу тяжелое событие в нашей семье: был арестован и осужден на одном из первых процессов того времени один из дальних родственников отца — банковский работник, и мой отец вместе с поэтом О.Э. Мандельштамом — нашим дальним родственником, направлял все свое внимание на ходатайство у А.Я. Вышинского, тогдашнего ректора МГУ, о смягчении участи осужденного" [34].

Приведенные краткие выдержки из воспоминаний того времени, отстоящие от нас почти на три четверти века, свидетельствуют и о малочисленности работающих (три человека и только один из них был полностью занят решением поставленной задачи), но увлеченных и увлекших даже членов своей семьи, а с другой стороны жизнь обильно обрушивала на них и свои горести.

Хорошо известно, что первоначальные поиски тонкой структуры увенчались открытием комбинационного рассеяния света (раман-эффект), сделанного на неделю раньше Рамана, а горести сильно задержали публикацию [23].

Но после основных исследований комбинационного рассеяния Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг снова принимаются за экспериментальное решение, как они говорили, "первоначальной задачи".

Оптическая лаборатория на физическом факультете МГУ в то время была не только малочисленна, но и бедна оборудованием — в ней имелся старый кварцевый

спектрограф фирмы "Fuss", стеклянная пластинка Люммера–Герке и ртутная лампа. С.Л. Мандельштам [34] вспоминает, что на вопрос одного из зарубежных коллег Ландсбергу, почему он "использовал наименее подходящий для этой цели прибор", Григорий Самуилович ответил: "А другого у нас не было". Пластинка Люммера–Герке также не отвечала условиям задачи и могла дать только качественный ответ об изменениях в спектре рассеянного света.

В архиве Г.С. Ландсберга есть запись, дающая представление об опыте с применением пластинки Люммера–Герке. Г.С. Ландсберг пишет следующее: "Опыты, уже давно ведущиеся в нашей лаборатории в этом направлении, привели в настоящее время к некоторым результатам.

Рассеяние в кварце изучалось при помощи пластинки Lummer–Gerke ($5 \times 15 \times 140$ мм), расположенной так, что угол $\theta = 90^\circ$.

Источником света служила ртутная лампа при напряжении на клеммах 40 В, чтобы обеспечить достаточную резкость интерференционной картины.

При применении стеклянной оптики линия 4358 А в фотографическом отношении настолько превосходит все остальные, что отпадает необходимость применения светофильтров или каких-либо иных методов монохроматизации.

Хотя опыт велся в совершенно изолированной и весьма постоянной в тепловом отношении комнате без окон и отопления, тем не менее необходимо было убедиться в отсутствии (в течение весьма продолжительной экспозиции (6 часов))⁴ мешающих действий возможных колебаний температуры.

Для этой цели прямой свет той же лампы, ослабленный диафрагмами и фильтрами примерно до интенсивности света, рассеянного кварцем, падал на вторую пластинку L.G., аналогичную первой.

В результате 144-часовой экспозиции оказалось, что интерференционная картина, полученная от прямого света, не отличалась по резкости от соответствующей картины, получаемой при коротких экспозициях, и следовательно, в наших условиях колебания температуры и прочее не влияли сколько-нибудь заметно.

Картина же в рассеянном свете значительно уступала в отчетливости картинам, получаемым от прямого света, и весьма напоминает по характеру картину, получаемую при помещении ртутной лампы в магнитное поле (Zeeman-расщепление).

Таким образом, расширение или расщепление линий рассеянного света не вызывает сомнения. О величине этого расширения (расщепления) наши опыты позволяют судить лишь весьма приблизительно.

Расстояние между двумя последовательными порядками в нашей пластинке соответствует для $\lambda = 4358$ А приблизительно 0,17 А, т.е. заметное расплывание интерференционной картины свидетельствует о расщеплении (расширении) линий, достигающих минимум нескольких сотых долей ангстрема".

Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг не могли, разумеется, удовлетвориться результатами, которые можно было получить с помощью их аппаратуры, и

поэтому они обратились к академику Д.С. Рождественскому, который стоял во главе организованного им Государственного оптического института (ГОИ) в Ленинграде (С.-Петербург). Среди оборудования ГОИ был эшелон Майкельсона, способный разрешить тонкую структуру линии Рэлея, предсказанную теоретически (формула (5)), если такая существует в действительности.

Г.С. Ландсберг [10] следующим образом пишет о сложившейся ситуации: "Ввиду недостатка оптического оборудования в МГУ аналогичная работа была начата по просьбе Л.И. Мандельштама и Г.С. Ландсберга одновременно в Государственном оптическом институте в Ленинграде Е.Ф. Гроссом. Гросс также получил указание на существование предполагаемого явления в кварце.

Одновременно Гросс произвел успешные опыты по исследованию структуры линии рассеянного света в жидкостях, где, как указывалось выше, казалось более правдоподобным ожидать размытые линии".

Совершенно определенно можно сказать, что в Москве с пластиной Люммера–Герке и в Ленинграде с эшелом Майкельсона шла энергичная работа по обнаружению тонкой структуры линии Рэлея в рассеянном свете в кристалле кварца. Можно предположить, что первоначально Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг в Москве и Е.Ф. Гросс в Ленинграде все усилия направляли на обнаружение эффекта, совершенно не задумываясь над тем, какова будет форма или способ публикации, если явление будет обнаружено и в Москве, и в Ленинграде.

Из уже приведенного высказывания Г.С. Ландсберга следует, что искомое явление было обнаружено, но, если можно так сказать, по-разному, а точнее пластинка Люммера–Герке давала возможность только констатировать уширение линии рассеяния и не могла различать расщепление от уширения, а эшелон был способен отличить уширение от дискретных компонент.

Как развивались исследования в Москве и Ленинграде и как взаимодействовали исследователи в период их работы, можно судить по имеющимся данным. В архиве Г.С. Ландсберга, предоставленном сыном Г.С. Ландсберга Леонидом Григорьевичем, есть несколько писем Е.Ф. Гросса и черновик неопубликованной краткой заметки о результатах экспериментальной работы Л.И. Мандельштама и Г.С. Ландсберга, а также некоторые черновики писем, предназначавшихся Е.Ф. Гроссу.

В своем биографическом очерке о Гроссе профессор Б.В. Новиков [35] говорит об архиве Гросса, но он же говорит, что там ничего нет относительно интересующей нас темы. В частности, не сохранились письма Г.С. Ландсберга Е.Ф. Гроссу. Поэтому здесь будет сказано только о том, что достоверно известно из материалов архивов или публикаций.

4. Начало параллельной работы в МГУ и ГОИ по обнаружению тонкой структуры линии Рэлея

Установить с полной определенностью, когда Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг предложили параллельно с ними начать работу в ГОИ, не представляется возможным. Также нет сведений, где, как и кем персонально

⁴ По-видимому, в черновике письма сделана описка: вместо "6 часов" следует читать "6 суток".

была достигнута договоренность о проведении этой работы в ГОИ. Единственное, что несомненно, — это то, что Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг договорились об этом с директором ГОИ академиком Д.С. Рождественским. Известно, что эту экспериментальную задачу начал выполнять Евгений Федорович Гросс.

Хочется думать, что Е.Ф. Гроссу очень повезло. Сотрудничество с такими крупными физиками, какими были Мандельштам и Ландсберг, и решение такой значительной задачи для физики вообще не часто выпадает на долю научного работника. Из письма Е.Ф. Гросса Г.С. Ландсбергу, датированного 11 апреля 1929 г., явствует, что к этому времени задача уже была сформулирована. Е.Ф. Гросс приступил к поискам подходящего образца кварца. По-видимому, Ландсберг хотел приехать к началу опытов Гросса как человек, уже имеющий большой опыт работы с рассеянием света в кварце, но работа не была еще развернута и поэтому приезд был преждевременным. Можно полагать, что Гросс начал осуществлять экспериментальную задачу, сформулированную Мандельштамом, в апреле 1929 г.

В Москве та же самая задача решалась с самого начала знакомства Г.С. Ландсберга с Л.И. Мандельштамом, во всяком случае не позднее 1926 г., поскольку в 1927 г. уже начались публикации, упомянутые выше.

После начала экспериментальной работы Е.Ф. Гросса прошел практически год. В архиве Г.С. Ландсберга не сохранилось никаких свидетельств того, как этот год прошел, но из архива Г.С. Ландсберга и писем Е.Ф. Гросса следует, что Г.С. Ландсберг в течение прошедшего года в Ленинград ездил. Следующее письмо Е.Ф. Гросса датировано 26 марта 1930 г. и в нем уже обсуждается вопрос о публикации полученных Гроссом результатов, подтверждающих правильность теоретических предсказаний.

Прежде чем обсуждать развитие событий с течением времени и конкретно то, что было получено в результате нелегкого труда экспериментаторов, представляется целесообразным обратить внимание на стиль физических исследований, которого придерживались Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг всю свою жизнь. Мало сказать, что они были очень требовательны или даже "придирчивы" к себе и к другим людям, кем бы они ни были, когда речь шла об измерении любой величины или наблюдении физического явления. Достоверность измеренных величин или наблюденных явлений должны быть доказаны, обоснованы всеми возможными способами и, когда не оставалось никакого сомнения в справедливости полученного, тогда это результат и его можно обсуждать, а до того не о чем говорить.

Это требует времени, это раздражает, это огорчает и т.д., и т.п., но будет только так, как они требуют, и не иначе.

Если дело доходит до публикации (это бывает далеко не всегда), то отношение к тексту публикации также было особое. Текст должен быть написан хорошо, это само собой разумеется. Но этого мало. Каждая фраза должна выражать только ту мысль, которую автор хотел выразить и ничего другого. Это нелегко сделать в ряде случаев, но это требовалось категорически. Статья с готовыми результатами отправлялась в печать не сразу. Она должна "созреть". Может быть, что-нибудь нужно будет изменить, исключить или добавить. Может слу-

*Структура основных линий молекулярной
решетки кварца.*

*Вопрос о структуре основных линий при молекулярном рассеянии
света в исландском кварце рассмотрен в предыдущей
работе (см. Физический журнал, № 587, 1929; Физ. журн., № 157, 1929;
З.ф.Ж., 60, 334, 1930).*

*Многоточечная структура решетки кварца на границе поверхности
была исследована в работе, где наряду с появлением колебл-
нчатых структур в области наблюдения также упомянуто
использование линий от λ_0 до $\lambda_0 \pm 20\% \frac{\lambda_0}{D}$, где $D \sim \frac{D}{\lambda_0}$
структур амплитуды и ширины волн в среде, а θ — угол между направ-
лением луча и направлением рассеянного света. Величина рассеянного
света зависит от угла от направления наблюдения. Предположение
то, что величина θ с некоторой определенностью зависит от λ
представляет собой весьма интересный вопрос. Но не
следует в настоящее время вводить в обиход вопросы, в каком
степени можно считать θ ~~функцией~~ функцией λ на два
разные компонента. Во всяком случае, можно считать, что в рассея-
нии света при рассеянии света в кварце, в частности, в кварце
были найдены величины.*

*Представленные данные являются результатом работы Л.И. Мандельштама
в работе, посвященной рассеянию света в кварце (Физ. журн.,
17, 29, 1928)*

*Вопрос, касающийся структуры в нашей лаборатории, связан с появ-
лением в кварце и некоторых структур.*

Рассеяние в кварце изучалось при помощи методики Ландсберга.

Первая страница текста заметки, написанной рукой Г.С. Ландсберга, вероятно, как вариант текста для публикации параллельно с публикацией Е.Ф. Гросса о тонкой структуре в кристалле кварца. (Из архива Г.С. Ландсберга.) (Полный текст заметки приведен на с. 103.)

читаться, что мысль, которую авторы хотят донести до читателя, следует изложить иначе и т.д., и т.п. Так они работали, и ни разу свои результаты им не приходилось брать обратно.

Хорошо известно, что существует совершенно другой стиль или манера работы — пришла какая-нибудь мысль или увидел в эксперименте нечто, как показалось, новое, немедленно публиковать. Если в дальнейшем не подтвердится, следовательно, ошибся, а если подтвердится, тогда я первый это сказал, обнаружил, установил. Приоритет мой! Такой стиль работы был абсолютно чужд Л.И. Мандельштаму и Г.С. Ландсбергу. Следует отметить, что, по-видимому, многие исследователи по своей манере работы находятся между двумя описанными выше стилями работы и отношением к ней. Некоторые ближе к одному, другие ближе к другому. Люди разные и ведут себя по-разному.

Возвратимся теперь ко второму письму Е.Ф. Гросса от 26 марта 1930 г., в котором говорится, что он посылает текст заметки о результатах своих опытов, предполагая, по-видимому, что Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам приготовили заметку о результатах своих опытов. Гросс пишет: *Специально послать Вам текст моей заметки. Пишу по-немецки, так как, хотя мы и забыли с Вами условиться, в каком журнале мы поместим наши заметки, думаю, что будем печатать в Naturwissenschaften или в Zeitschrift fur Physik. Простите, что задержал с присылкой.*

Как уже упоминалось выше, в архиве Гросса не сохранилось писем Г.С. Ландсберга, как мне сообщил об этом профессор Б.В. Новиков, и точно сказать, как отреагировали москвичи на письмо от 26 марта 1930 г., сказать трудно. Однако Г.С. Ландсберг ко всему относился весьма ответственно, в том числе и к письмам. В архиве Г.С. Ландсберга сохранились черновики некоторых писем Е.Ф. Гроссу, на клочках бумаги, без полного обращения и без даты. Разумеется, эти записи вовсе не предназначались для печати и не исключено, что содержание посланного письма было несколько иным. Мне представляется, однако, что оставшиеся черновики дают представление об отношении к разным аспектам рассматриваемой задаче тех, кто в ее решении принимал деятельное участие.

К ответу на письмо Е.Ф. Гросса от 26 марта 1930 г. и не только на него можно было бы отнести содержание черновика, в котором сказано буквально следующее:

Многоуважаемый Евг. Федор!

Возвращаю Вам согласно Вашему желанию рукопись Вашей заметки.

За это время я произвел еще несколько опытов и по возвращении Л.И., обсудив весь имеющийся у нас материал мы пришли к заключению, что в настоящий момент нам было бы преждевременно выступить с публикацией и мы продолжаем работу.

Вопрос же о Вашей публикации и о той форме, в которую Вы пожелаете ее облечь, мы предоставляем всецело на Ваше усмотрение.

Со своей стороны я прошу Вас, как я уже об этом писал, исключить ссылку на мое Вам сообщение относительно расширения линий.

Уважающий Вас Г.

В конце письма (черновика) Г.С. Ландсберга, цитированного выше, нет даты, нет обычной подписи, но оно написано рукой Г.С. Ландсберга и на ней есть следы редактирования, как и в других черновиках, сохранившихся в архиве.

В следующем письме Е.Ф. Гросса, написанном 3 апреля 1930 г., есть упоминание о полученном письме Г.С. Ландсберга, цитированном выше, и есть просьба "исключить из Вашей заметки всякое упоминание обо мне и работах в Оптическом институте ...".

Как развивались события дальше, отчасти можно судить из последующих писем Е.Ф. Гросса Г.С. Ландсбергу. Так, в письме от 20 апреля 1930 г. Е.Ф. Гросс пишет:

Многоуважаемый Григорий Самуилович!

Стоит ли откладывать опубликование наших опытов с кварцем? Если Вы считаете преждевременным это сделать на основании Ваших опытов, то можно использовать мои результаты.

Как я Вам уже говорил, когда Вы были в Ленинграде, я не считаю для себя возможным одному публиковать мои опыты с кварцем.

Но возможно ведь отказаться от одновременных независимых публикаций, а остановиться на втором из вариантов, о которых мы с Вами говорили: сейчас опубликовать нашу общую заметку, а дальнейшее печатать уже независимо. Мы с Вами первоначально выбрали первый вариант как более естественный, но и второй вариант имел свои "за". И Вы и я работали над кварцем, и Ваша и моя работа была связана с Леонидом Исааковичем, а потому в первой публикации и выступаем сов-

местно. Во всяком случае, из-за способа напечатанья заметки рисковать нашей работой, мне кажется, не стоит. Ведь не так уж это существенно! Было бы очень обидно, если бы мы и в этом случае опоздали с публикацией о явлении, которым в России так много занимались.

Итак, мое предложение: сейчас в совместной заметке публикуем наши опыты с кварцем и уже после этого каждый из нас публикует независимо то, что ему одному принадлежит (подобно тому, как Вы уже публиковали с Леонидом Исааковичем теоретические соображения по поводу эффекта в кристаллах, которым мы с Вами занимались): Вы — свои дальнейшие опыты с кварцем, о которых Вы мне говорили, я — свои опыты со спектрографом с большой дисперсией, опыты с жидкостями и т.п.

Сообщите, по возможности скорее, как Вы относитесь к этим предложениям.

И в следующем письме Е.Ф. Гросс 30 апреля 1930 г. пишет: ... еще раз повторяю, мне не хотелось бы опубликовать мои опыты с кварцем одному.

Ответ Г.С. Ландсберга имеет дату, хотя и не имеет подписи, но, как и другие, написан рукой Г.С. Ландсберга и имеет много редакторских правок. Письмо это следующее:

Москва 19/V 1930

Многоуважаемый Евгений Федорович!

В настоящее время еще было бы преждевременно обсуждать формы будущей публикации. Конечно, к какому бы результату мы не пришли, мы сообщим Вам. Если результаты будут противоречивыми, придется исследовать причину, если они окажутся подтверждающими друг друга, можно будет найти форму совместной публикации.

Но еще раз повторяю, что мы ни в коем случае не хотели бы, чтобы наши сомнения задержали Вашу публикацию, если Вы считаете имеющиеся в Вашем распоряжении материалы достаточно убедительными.

В архиве Г.С. Ландсберга есть черновик письма без даты и подписи, который мог выражать смысл письма, отправленного Е.Ф. Гроссу. Привожу ту его часть, которая относится к нашей теме:

Многоуважаемый Евгений Федорович!

Как я уже писал Вам, наши опыты в настоящее время не кажутся нам достаточно убедительными для публикации и мы хотим предварительно выяснить все сомнительные пункты. Но было бы, конечно, жаль задерживать публикацию Вашей работы, поскольку Вы уверены в результатах. С теоретической стороны кажется нам достаточно хорошо обоснованным, особенно теперь, когда его существование дало бы естественное дополнение к комбинационному рассеянию. Поэтому положительный результат опыта представляется весьма правдоподобным. Однако в таких явлениях, находящихся на границе обнаруживаемости, необходимо все же близко стоять к эксперименту, чтобы признать результаты достаточно убедительными.

Поэтому Вам приходится одному судить о возможности публикации. Наше же активное участие в Вашей публикации нам не представляется целесообразным, но повторяю, что не должно останавливать Вас.

Следующее письмо Г.С. Ландсберга Е.Ф. Гроссу было послано, по-видимому, уже после того, как Гросс отправил в печать результаты своих опытов, о чем Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг еще не знали.

В следующем письме Г.С. Ландсберг пишет Гроссу:
Мног. Евг. Федор.!

После ряда контрольных опытов мы получили в настоящее время результаты, которые считаем достаточно надежными. Получен. фотограф., несомненно, свидетельствуют о расширении или нерезком расщеплении порядка не меньше ожидаемого теоретически (са. 0,17 А).

В таком виде эти результаты не противоречат полученным Вами, хотя не дают права утверждать расщепление.

Правда, при имеющейся у нас пластинки L.G. только достаточно резкое расщепление могло бы быть обнаружено.

Расщепление с уширением дало бы картину, сходную с простым расширением, охватывающим обе линии.

Т.обр., нам кажется, что в настоящий момент возможно параллельное опубликование наших результатов.

Если, как Вы писали, Вы продолжаете считать параллельную публикацию желательной, то можете послать оба текста одновременно Naturwissenschaft.

На письмо Ландсберга Гросс отвечает письмом от 17 июня 1930 г. Письмо привожу полностью.

Многоуважаемый Григорий Самуилович!

К сожалению, Ваше письмо несколько запоздало. Я только что перед этим, наконец решившись, отправил в Zeitschrift fur Physik краткую заметку о своих опытах приблизительно в той форме, проект которой я Вам уже присылал.

Полная неопределенность с публикацией моих опытов, длившаяся 3 месяца, поколебала наконец мою нерешительность. Этому способствовали, конечно, Ваши неоднократные любезные советы не откладывать печатанья моей заметки.

Дмитрий Сергеевич, видевший Леонида Исааковича в конце мая на сессии Академии наук, также сообщил мне, что Леонид Исаакович по-прежнему предпочитает осторожность в этом вопросе и не доверяет моим опытам.

Между тем я, как имеющий некоторый опыт в работе с приборами большой разрешающей силы, знал, что в данном случае получить даже те результаты, которые я получил, представляют большие затруднения и сделать их еще более убедительными очень трудно.

А ведь 3 месяца срок не маленький!

Но так как я все же более или менее уверен в своих результатах, то после долгих колебаний я наконец решил не задерживать далее печатания и на свой страх и риск выступить с публикацией.

Мне жалко было бы, если бы моя работа над этим вопросом пропала даром. (Для Вас этот вопрос, по видимому, не имеет особого значения.)

Обдумав содержание Вашего письма и текста Вашей заметки, я пришел к убеждению, что вряд ли мне целесообразно участвовать в параллельной публикации. Таким образом, вопрос о Вашей публикации я всецело предоставляю на Ваше усмотрение.

Я еще хотел бы только обратить Ваше внимание на то, что заключение Ваше относительно величины расширения линии мне представляется не вполне правильным.

Так как расстояние между порядками Вашей пластинки са. 0,165 А, то мне кажется, что по исчезновению интерференционной картины можно сказать, что расширение линии (полное) не меньше этой величины (полуширина не меньше половины расстояния между порядками).

Теоретическая же ширина (полная), если предположить, что отдельные Feinstruktur-компоненты неразличимы, са. 0,35 А, т.е. вдвое больше.

Всего хорошего

Ваш Е. Гросс.

Последние записки, которыми обменялись между собой Г.С. Ландсберг и Е.Ф. Гросс, были следующие: записка Г.С. Ландсберга от 21 июня 1930 г., содержащая просьбу вернуть посланную Гроссу рукопись текста, которую, по-видимому, Ландсберг и Мандельштам намеревались опубликовать параллельно с заметкой Е.Ф. Гросса, и записка Е.Ф. Гросса, в которой сказано:

Многоуважаемый Григорий Самойлович!

Возвращаю Вам текст Вашей заметки, как Вы пожелали.

С совершенным почтением

Е. Гросс

Ленинград, 4-VII-1930.

Москва, 2/VI 1930.

Многоуважаемый Евгений Федорович!

Гроссу Вас вернутой мне копии моей заметки

замечки, написанной Вами ^{4 го.} ~~в~~ ~~тексте~~ ~~и~~ ~~на~~ ~~д~~

С добрыми и успешными

З. Ландсберг

Письмо Г.С. Ландсберга Е.Ф. Гроссу с просьбой вернуть "проект текста нашей заметки", которая, по-видимому, уведомляла Е.Ф. Гросса, о том, что хотели бы опубликовать Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам по результатам своих опытов. Их заметка не была опубликована.

Теперь хорошо известно, что Е.Ф. Гросс опубликовал свою заметку. Ниже мы приведем текст этой заметки, а то, что существовала в то же время заметка Г.С. Ландсберга и Л.И. Мандельштама о результатах их опытов, было неизвестно, поскольку они ее не опубликовали. Е.Ф. Гросс в письме, приведенном выше, ясно написал: ... *вряд ли мне целесообразно участвовать в параллельной публикации.* Но это, по-видимому, не могло служить основанием, чтобы Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам не публиковали результаты своих опытов. К сожалению, мы не располагаем текстом заметки, которую Е.Ф. Гросс вернул в июле 1930 г., но в архиве Ландсберга сохранился черновик текста, написанный рукой Г.С. Ландсберга, который, можно полагать, был копией или вариантом текста той заметки, что послалась Е.Ф. Гроссу.

Ниже текст этой заметки будет приведен, и он представляет несомненный интерес, тем более, что физикам неизвестно, что Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам энергично и много занимались экспериментальным поиском тонкой структуры линии рассеянного света в кристаллах кварца.

5. Результаты первых опытов Г.С. Ландсберга и Л.И. Мандельштама и Е.Ф. Гросса, изложенные ими самими

Отношение Ландсберга и Мандельштама к результатам своих многолетних опытов по поиску тонкой структуры в спектре света, рассеянного в кварце, выразилось вполне

определенно. Они просто не опубликовали эти свои результаты. По-видимому, и здесь сказались чрезвычайно высокие требования к себе и к своим результатам.

Между тем в их заметке есть совершенно определенные, четкие наблюдения. Поэтому приведем текст черновика заметки, написанной Ландсбергом, хотя нет никакой уверенности, что этот шаг был бы одобрен авторами.

В приводимом ниже тексте заметки, написанной рукой Ландсберга, не названы авторы, неизвестно, согласован этот текст с соавтором или только подготовлен для этого. На рукописи есть дата. Содержание заметки следующее:

Структура основных линий молекулярного рассеяния света

Вопрос о структуре основных линий молекулярного рассеяния света в твердых телах неоднократно затрагивался нами в предыдущих работах (*die Naturwissenschaften* 16 567 (1928); *Журнал прикладной физики* IV 155 (1929); *Z.f.Ph.* 60 344 (1930)).

Теоретические представления о рассеянии света на упругих тепловых волнах приводят к заключению, что наряду с появлением комбинационных трабантов должно наблюдаться также изменение частоты основных линий от v_0 до $v = v_0 \pm 2v_0(v/V) \sin(\theta/2)$, где v и V — скорости акустических и световых волн в среде, а θ — угол между первичным лучом и направлением рассеянного света. Величина расщепления зависит, таким образом, от направления наблюдения. Представление это тесно связано с теорией удельной теплоты твердых тел и предполагает идеальный случай незатухающих упругих волн. Мы не будем в настоящий момент входить в обсуждение вопроса, в какой степени можно ожидать расщепления линий на два резких компонента. Во всяком случае нужно ожидать в рассеянном свете изменения основных частот, достигающего указанного выше порядка величины.

Приведенное выше соотношение выведено также L. Brillouin'ом в работе, посвященной рассеянию рентгеновских лучей (*Ann. d. Phys.* 17 88 (1922)).

Опыты, уже давно ведущиеся в этом направлении в нашей лаборатории, привели в настоящее время к некоторым результатам.

Рассеяние в кварце изучалось при помощи пластинки Lummer–Gehrke ($5 \times 5 \times 140$ мм), расположенной так, что $\theta = 90^\circ$. Рассеянный свет направлялся на одну часть пластины L-G, на вторую при помощи ряда зеркал отбрасывался прямой свет лампы, ослабленный соответствующим образом. На фотографии получаются рядом интерференционные картины прямого и рассеянного света.

Экспозиции — 6 суток, пластинки — Iford Monarch. Свет, рассеянный кварцем, дает полное отсутствие интерференционной картины, в то время как контрольная половина снимка дает отчетливые линии⁵.

⁵ Слабые, едва заметные на негативе максимумы могут объясняться ничтожной примесью паразитного света или действием трабанта комбинационного рассеяния, соответствующего $\lambda = 21\mu$. Этот трабант достаточно интенсивен (около 25 % основной линии); однако весьма возможно он недостаточно монохроматичен, чтобы давать интерференционную картину (ср. *Z.f.P.* 2 58, 250 (1929)).

Расстояние между двумя последовательными порядками нашей пластины соответствует (для $\lambda = 4358 \text{ \AA}$) 0,165 \AA . Исчезновение интерференционной картины свидетельствует, следовательно, о расширении не меньше этой величины, которая совпадает с теоретически предвиденным расширением, согласно приведенной формуле. Фотография молекулярно-рассеянного бензолом света, сделанная в той же установке, дает ясную интерференционную картину, хотя и значительно менее отчетливую, чем прямой свет. Это стоит в согласии с оценкой Кабанна, согласно которой уширение линий бензола должно быть $< 0,1 \text{ \AA}$.

Вопрос о том, имеем ли мы дело с расширением линий или с их расщеплением, не может быть окончательно решен на основании приведенных опытов. В силу недостаточной разрешающей силы нашей пластинки расщепление (особенно сопровождающееся некоторым уширением компонент) не могло бы быть отлучено от расширения. Публикуемое ниже сообщение Е.Ф. Гросса говорит в пользу расщепления линий. Измерения Гросса привели его к количественной оценке расщепления, совпадающей с теорией и не противоречащей нашим наблюдениям.

Для выяснения правильности всего представления в целом существенными являются опыты над рассеянием под другими углами θ .

Москва, 2/V 1930.

Результаты, описанные в этой заметке, как в ней самой говорится, не решают вопроса о том, есть ли расщепление линий или расширение. Однако в этой работе было установлено, что спектр света, рассеянного в кварце, отличается от спектра возбуждающего света. Это, несомненно, в то время было уже не так мало, а главное — является доказательством того, что Ландсберг и Манделштам даже с аппаратурой, не подходящей для решения поставленной задачи (другой не было), достигли результатов, представляющих интерес.

То, что аппаратура неподходящая, Ландсберг и Манделштам хорошо понимали и именно поэтому по их инициативе в Ленинграде в ГОИ работал Е.Ф. Гросс.

Результат своей работы Гросс [36] послал для публикации в мае 1930 г. Текст этой статьи в переводе Т.Е. Хольц ниже публикуется полностью.

Об изменении длины волны при рассеянии света в кристаллах⁶

Е.Ф. Гросс

(Ленинград, 11 июня 1930)

Уже неоднократно указывалось на то, что молекулярное рассеяние света связано с изменением плотности, вызванным упругими колебаниями, которые, согласно Дебаю [6], всегда существуют в твердых телах. При этом оказывается, что при рассеянии (отражении) света на этих распространяющихся со скоростью звука в твердом теле цугах упругих волн может возникнуть изменение длины световой волны, вызванное изменением амплитуды рассеянного света со временем: вследствие этого вместо частоты ν_0

⁶ Ссылки на литературу в оригинальной статье даны в подстрочном примечании. В приведенном тексте ссылки заменены цифрами, указывающими те же статьи в общем списке литературы (И.Ф.).

падающего света в рассеянном излучении должны наблюдаться две измененные частоты

$$v = v_0 \pm 2v_0 \frac{v}{c} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

где v и c обозначают скорости звука и света в теле соответственно и θ — угол между лучами падающего и рассеянного света.

По просьбе профессора Л. Мандельштама, уже давно предсказавшего эту тонкую структуру рассеянного света⁷, проверить на кристаллическом кварце справедливость этого теоретического предположения я предпринял эксперименты с целью наблюдать это явление и убедиться в ожидаемом расщеплении.

Свет ртутной дуги $\lambda = 4358 \text{ \AA}$ с водяным охлаждением был с помощью конденсора сконцентрирован на большой кусок очень чистого кварца.

Свет, рассеянный под углом 90° , исследовался с помощью ступенчатой решетки (30 ступеней). Эксперимент значительно осложнялся необходимостью проводить съемку в течение длительного времени (около 80 часов), что было вызвано малой интенсивностью рассеянного света. Изменение атмосферного давления и температуры (несмотря на то, что ступенчатая решетка была защищена от колебаний температуры) повлекло за собой некоторое размытие изображения.

На основании некоторых полученных мной снимков кажется возможным сделать определенные выводы, которые я хочу здесь вкратце изложить.

Линии рассеянного в кварце света шире линии падающего света. Спектр рассеянного света выглядит так, как если бы он состоял не из одной линии. На снимках можно различать отдельные максимумы, смещенные относительно длины волны падающего света.

На некоторых снимках присутствует также первоначальная линия, она, однако, слабее смещенных линий. На некоторых снимках она, по-видимому, отсутствует. При этом, однако, следует учитывать сложность полного устранения постороннего света.

В целом есть намек на присутствие четырех линий, две из которых видны более отчетливо.

Как известно, определение длин волн с помощью ступенчатой решетки не однозначно. В неких порядках можно для более четко видимых максимумов получить разности длин волн (около $0,180 \text{ \AA}$), хорошо согласующиеся с теоретическим значением (около $0,187 \text{ \AA}$). Два других максимума можно интерпретировать как линии с двойным расстоянием и, возможно, отнести их к оборотам.

Эти результаты, по-видимому, подтверждают существование искомого эффекта.

В настоящее время эксперименты повторяются с использованием других средств, а также проверяется зависимость расщепления от угла рассеяния θ .

Ошибочными кажутся заключения об отсутствии этого явления, сделанные Bogros и Rocard [39] на основании их экспериментов. Ни при критической опалесценции смеси двух жидкостей, вызываемой

усилением медленно нарастающих изменений концентрации, ни при критическом состоянии жидкость–пар, при котором скорость распространения изменений плотности (а значит, и скорость звука) должна быть, согласно условию $dP/dV = 0$, незначительной, нельзя ожидать сколько-нибудь заметного расщепления линий рассеянного света.

В связи с этим в экспериментах с оптическим стеклом я не наблюдал возможного расщепления или расширения линий рассеянного света: согласно Раману [41], повышенное рассеяние света в твердых аморфных телах так же, как и в жидкостях вызывается локальными неоднородностями значений плотности или концентрации, но в этом случае их следует считать "неподвижными"⁸.

Подробное описание экспериментов будет приведено в другой публикации.

Я выражаю мою сердечную благодарность директору Государственного Оптического института господину профессору Д. Рождественскому за большой интерес к этой работе, за внесенные им ценные предложения и постоянную поддержку при проведении экспериментов.

Я сердечно благодарю господина профессора Л. Мандельштама, по чьей инициативе были поставлены мои опыты, подтвердившие, по-видимому, его идеи и живой интерес к моим экспериментам и плодотворное обсуждение их результатов.

Ленинград, Государственный Оптический институт,

Май 1930.

6. Некоторые сомнения и недоумения

К первой экспериментальной работе, подтверждающей предсказание нового оптического эффекта, нельзя предъявлять слишком большие требования, особенно теперь, по прошествии почти 70 лет, когда явление хорошо изучено. Однако некоторые недоумения, по-видимому, высказать следует.

В хорошо известной Е.Ф. Гроссу работе Мандельштама [12] показано, что в спектре света, рассеянного в любой среде, должна существовать центральная линия, обусловленная флуктуацией энтропии или температуры.

К центральной компоненте, как правило, добавляется большое количество паразитного света вследствие дислокаций и разнообразных посторонних неоднородностей.

В таком случае трудно понять утверждения Гросса [36, 37]: "Основную линию также можно было заметить на большинстве снимков, но она всегда была слабее смещенных линий. На некоторых снимках она отсутствовала". По-видимому, отсутствие центральной линии — это недоразумение, и с тех пор такой особенности никто не наблюдал.

Есть также неясность с наблюдением смещенных линий. Гросс пишет: "... следует учитывать сложность полного устранения постороннего света. В целом есть намек на присутствие четырех линий, две из которых видны более отчетливо".

⁷ См., например, Л. Мандельштам [12], Л. Мандельштам, Г. Ландсберг и М. Леонтович [38], а также Л. Бриллюэн [13].

⁸ Разумеется, расщепление может и не возникнуть, если увеличение рассеянного света в стекле вызвано примесями.

По мнению Гросса, "два других максимума можно интерпретировать, как линии с двойным расстоянием и, возможно, отнести их к обертонам".

Казалось бы, что обертоны могли появиться только в результате акустической нелинейности, о которой здесь не может быть речи. Никогда также не наблюдалось эквидистантное положение смещенных линий.

В твердом теле одновременно может быть наблюдаемо шесть смещенных линий — две от продольной упругой волны и четыре от двух поперечных волн — быстрой и медленной. Положение соответствующих линий не будет эквидистантным, но будет определяться величиной скорости звука. Кроме того, всегда будет наблюдаться центральная или рэлеевская линия. Вызывает недоумение утверждение Гросса, что в критической области раствора двух жидкостей и в критической области жидкость–пар скорость звука может обратиться в нуль и, таким образом, расщепление линии спектра рассеянного света не будет наблюдаться. Между тем как из известной Гроссу работы Мандельштама [12] следует, что за расщепление линии "ответственна" адиабатическая скорость звука, с которой в критической области ничего катастрофического происходить не будет.

Остается также неясным утверждение Гросса [36], что в "экспериментах с оптическим стеклом я не наблюдал возможного расщепления или расширения линий рассеянного света". Причем этот отрицательный результат объясняется тем, что "... повышенное рассеяние света в твердых аморфных телах так же, как и в жидкостях вызывается локальными неоднородностями значений плотности или концентрации, но в этом случае их следует считать "неподвижными".

В дальнейших работах Гросс [36] сам наблюдал тонкую структуру линии Рэлея в жидкостях, а другие авторы позже наблюдали тонкую структуру линии Рэлея и в стеклах. Из работы Мандельштама [12] следует, что тонкая структура линии рассеянного света должна наблюдаться в любом веществе, если оно представляет собой сплошную среду.

Сказанное Гроссом в письме Ландсбергу от 17 июня 1930 г. "... замечание Ваше относительно величины расширения линии мне представляется не вполне правильным" вызывает недоумение. Гросс так же, как и Ландсберг и Мандельштам, расширение (расщепление) рассчитывал по формуле Мандельштама и Бриллюэна [12, 13] для одного и того же монокристалла кварца, и результат должен быть один и тот же.

Если же сомнение Гросса относительно к опытным данным Ландсберга и Мандельштама, то оно тем более не имеет основания, поскольку в заметке, написанной рукой Ландсберга и приведенной выше, сказано: "Расстояние между последовательными порядками нашей пластинки соответствует (для $\lambda = 4358 \text{ \AA}$) $0,165 \text{ \AA}$. Исчезновение интерференционной картины свидетельствует, следовательно, о расширении не меньше этой величины, которая совпадает с теоретически предвиденным уширением согласно приведенной формуле". Это совершенно справедливое утверждение. Здесь нет количественных измерений. Выражение "не меньше" подчеркнуто!

В публикации Гросса [40], сделанной через 10 лет после его первой работы на эту тему, есть ясное понимание характера спектра света молекулярного рассеяния, на который указано выше. К сожалению, Гросс

[36] в своей первой экспериментальной работе не привел фотографию спектра, который он получил и подверг измерительной обработке. Он не приводил также записи полученных им спектров и в последующих публикациях, относящихся к рассеянию света в кристаллах.

В одном из своих писем Гросс прямо говорит, что Л.М. Мандельштам не доверяет его опытам. Мандельштам и Ландсберг не хотят совместной (предложенной Гроссом) и даже параллельной публикации (в последнем письме и Гросс не желает параллельной публикации) и выходит, что в согласованно идущем параллельном исследовании нет согласия о времени и способе публикации. Гросс спешит опубликовать, Ландсберг и Мандельштам не спешат опубликовать, но, по-видимому, к параллельной публикации они готовились, хотя неизвестно, в какой степени были готовы это осуществить.

Е.Ф. Гросс под конец отказался от параллельной публикации и опубликовал свои результаты сам.

В письме Гросса Ландсбергу от 17 июня 1930 г. прямо говорится, что Дмитрий Сергеевич Рождественский виделся и разговаривал с Леонидом Исааковичем Мандельштамом, который "... по-прежнему предпочитает осторожничать и не доверяет моим опытам".

Что это утверждение означает? Что значит не доверять опытам? Точного ответа на этот вопрос сейчас получить не от кого. Можно, однако, высказать свою точку зрения на этот счет.

Теория Мандельштама [12] предсказывала, что в спектре света, рассеянного кварцем, должен наблюдаться триплет — центральная линия на частоте возбуждающего света и стоксов и антистоксов сателлиты. В теоретическом предсказании Бриллюэна [13] есть только стоксов и антистоксов сателлиты, а центральной линии вовсе нет.

По-видимому, Мандельштам "не доверять опытам" может только в одном случае — он не видит уверенно смещенных компонент и, по-видимому, удивлен отсутствием центральной линии на некоторых снимках.

Л.И. Мандельштам крупный физик и тонкий экспериментатор. Насколько можно судить, если он не доверяет, то это означает, что на основании представленных ему результатов он не может сделать определенных выводов в пользу подтверждения его же теории.

Нужно отметить, что и сам Гросс также, по-видимому, не уверен в своих результатах, потому что в том же письме от 17 июня 1930 г. пишет: "Но так как я все же более или менее уверен в своих результатах ..." (полную фразу см. выше).

Если сам экспериментатор не уверен в своих результатах, а в письме к своему коллеге пишет, что он "более или менее уверен в своих результатах", то надо полагать, для Ландсберга и Мандельштама это означало, что результата, несомненно подтверждающего теорию, нет.

Есть еще одно обстоятельство, которое могло смутить Л.И. Мандельштама. В первой своей публикации Гросс [36] указывает, что он наблюдает четыре линии, причем две линии более слабые, чем две другие. И далее сказано, что при таком отнесении два более слабых максимума можно интерпретировать как линии, смещенные на двойное расстояние и как обертоны первых двух частот (см. текст первой заметки Гросса, приведенной выше).

Разумеется, автор настоящей статьи только строит предположения о причинах, давших Л.И. Мандельштаму основание сказать Д.С. Рождественскому, что он не доверяет результатам Е.Ф. Гросса.

7. Тонкая структура спектра света, рассеянного в жидкостях

Обнаружение тонкой структуры линии рассеянного света в семи жидкостях, среди которых анилин, толуол, бензол, вода и др., было сделано Е.Ф. Гроссом.

Если свет, рассеянный кварцем, анализировался с целью найти предсказанную теорией [12, 13] тонкую структуру, то в случае жидкостей, как говорит Гросс [43]: "Вскоре после открытия эффекта Рамана я попытался выяснить, присутствует ли в рассеянном свете в разных органических жидкостях рамановы линии, вызванные вращательным движением молекул". Следовательно, первоначально эксперимент с прибором высокой разрешающей силы был направлен на обнаружение ротационного спектра комбинационного рассеяния в жидкости, а обнаружена была тонкая структура той же природы, что и в монокристалле кварца.

Это было неожиданное обнаружение совершенно нового явления, казавшегося тогда невозможным из-за сильного затухания высокочастотных упругих тепловых или дебаевских волн в жидкостях. Теперь этот результат кажется естественным и легко объяснимым, но тогда он был необычен и даже заставлял иначе смотреть на кинетическую теорию жидкостей [46].

Смещение частоты, возникающее в результате модуляции рассеянной волны упругой тепловой волной, при этом, как это показано в [12, 13],

$$\frac{\Delta v}{v} = \pm 2 \frac{v}{c} \sin \frac{\theta}{2}. \quad (8)$$

Здесь смещенные компоненты расположены по обе стороны от линии возбуждающего света, где v , c — скорости звука и света в среде соответственно.

При изучении спектров света, рассеянного в жидкостях, Гросс [44, 45] наблюдал некоторые особенности настолько необычные, что казалось необходимым менять всю теорию явления.

В эксперименте, о котором идет речь, Гросс [43] наблюдал не одну стоксову и одну антистоксову компоненты, а несколько компонент с каждой стороны от центральной компоненты и это обстоятельство заставило его сделать следующее утверждение: "Для рассеяния света в жидкостях равенство (8) следует заменить равенством

$$v = v_0 \left(1 \pm 2n \frac{v}{c} \sin \frac{\theta}{2} \right), \quad (9)$$

где $n = 0, 1, 2, 3$, и в соответствии с этим должна быть модифицирована теория рассеяния света на упругих волнах.

Число компонент, которые я наблюдал на своем приборе, $n \leq 3$, однако возможно присутствие компонент, соответствующих $n > 3$ ".

В следующей работе [45] подтверждаются прежние наблюдения, только подчеркивается, что при $n = 1$ в формуле (9) наблюдаемые линии интенсивней внешних компонент ($n = 2, 3, \dots$).

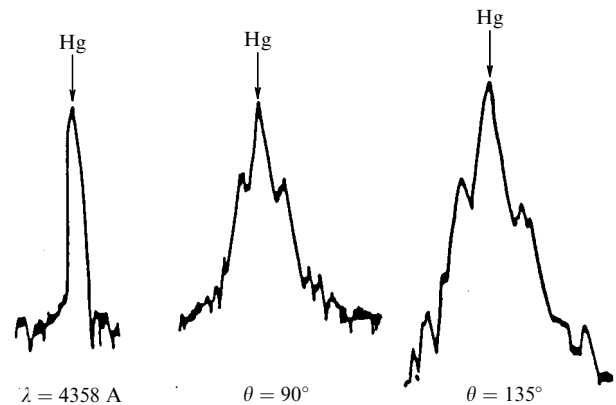


Рис. 1. Микрофотограмма спектра света, рассеянного в жидком бензоле под углом $\theta = 90^\circ$ и 135° при возбуждении рассеянного света линией $\lambda = 4358 \text{ \AA}$ спектра ртути (Е.Ф. Гросс [45]).

Как показали эксперименты, проведенные разными авторами в разных странах, особенно многочисленные с лазерными источниками возбуждающего света, во всех изученных жидкостях наблюдается одна стоксова и одна антистоксова компоненты, называемые теперь компонентами Мандельштама–Брюллоэна, хорошо описываемые формулой (8). Трудно сказать, почему Гросс [36, 37, 40, 42–45] в своих работах наблюдал больше компонент, чем есть на самом деле. По нашему мнению, это связано с несовершенством юстировки эшелона Майкельсона, но возможны и другие причины.

В исследованиях, опубликованных в 1932 г., Гросс [45] подтверждает справедливость своих прежних наблюдений на примере двух жидкостей, ранее не изучавшихся, — сероуглероде и хлорбензоле. В работе [45] впервые публикуется микрофотограмма спектра света, рассеянного в бензоле под разными углами при возбуждении рассеяния линией ртутного спектра $\lambda = 4358 \text{ \AA}$ (рис. 1).

Для сравнения приведен спектр света, рассеянного в бензоле при возбуждении рассеяния He–He лазером $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ и $\theta = 90^\circ$ (рис. 2).

Трудно поверить, что это один и тот же спектр одной и той же жидкости. Необыкновенно узкая и интенсивная линия света лазера радикально изменила спектроскопическую технику исследования, позволила обнаружить много нового, недоступного изучению прежде.

Новая техника также позволила с полной определенностью установить, какие линии в спектре присутствуют и представляют доказательство справедливости теории, а какие оказались фальшивыми.

Возвращаясь к утверждениям Гросса [45]: "Появление центральной несмещенной линии, которая по теории Бриллюэна–Мандельштама не должна присутствовать, можно объяснить суперпозицией неразрешенных смещенных линий за счет отражений более высоких порядков". Это сделанное здесь утверждение является, по видимому, результатом недоразумения, поскольку в работе Мандельштама [12] рассчитана зависимость от времени интенсивности центральной (несмещенной) линии, обусловленной флуктуацией температуры в чистых жидкостях или флуктуацией концентрации (состава) в растворе. Интенсивность эта выражена формулой (12) в [12].

Компоненты Мандельштама–Бриллюэна обусловлены той частью флуктуации плотности, которая опре-

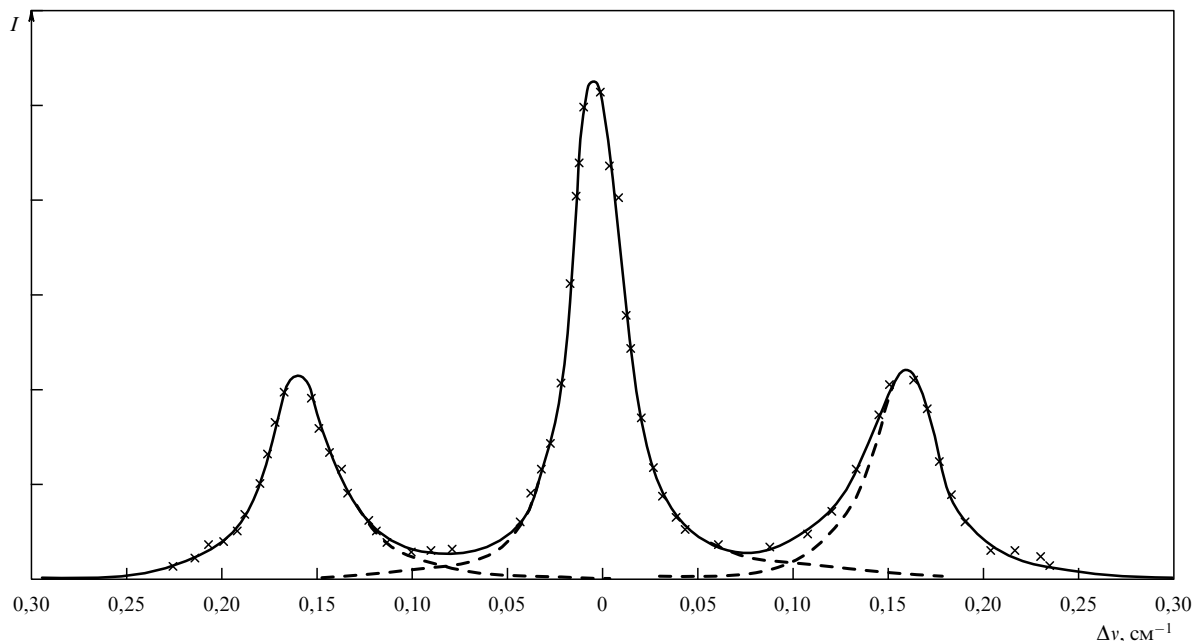


Рис. 2. Микрофотограмма спектра света, рассеянного в жидком бензоле под углом рассеяния $\theta = 90^\circ$ при возбуждении светом Ne–Ne лазера $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ (Маш, Старунов, Тиганов, Фабелинский [47]).

деляется флуктуацией давления Δp , а центральная или рэлеевская линия обязана своим происхождением флуктуации температуры ΔT или энтропии ΔS .

Изменение со временем флуктуации давления определяется уравнением Навье–Стокса.

Фурье-компоненты флуктуации давления есть истинные тепловые упругие волны.

Флуктуации температуры или энтропии меняются со временем по экспоненциальному закону, определяемому уравнением Фурье.

Скорость распространения тепловых упругих волн, порожденных флуктуациями давления, есть скорость звука.

Время рассасывания флуктуацией температуры или энтропии определяется коэффициентом температуропроводности.

В центральную компоненту спектра света, рассеянного в растворе, попадает также свет, рассеянный на флуктуациях концентрации, а скорость рассасывания флуктуаций концентрации определяется коэффициентом диффузии.

Таким образом, линии Манделъштама–Бриллюэна и рэлеевская линия формируется разными независимыми флуктуациями.

Кроме флуктуаций давления, энтропии и концентрации существует еще и флуктуация анизотропии (анизотропия не термодинамическая величина), которая в спектре представлена в виде широкой полосы — крыла линии Рэлея.

Современное состояние исследования спектров молекулярного рассеяния света далеко продвинуто. Спектроскопия рассеянного света составляет раздел молекулярной оптики, молекулярной акустики и особенно акустики весьма высоких частот ($\sim 10^{10}$ Гц), а также раздел молекулярной физики [8, 15, 16, 23, 24, 47].

Количественная обработка названных спектров позволяет определить, в частности, скорость и поглощение

гиперзвука, время релаксации вязкости, а также время релаксации анизотропии.

Применение спектров света молекулярного рассеяния к изучению различных явлений в газах, плазме, жидкостях, растворах и твердом теле оказывается эффективным для получения новых сведений.

Сказанное в этой статье касается только истории обнаружения части спектра — компонент Манделъштама–Бриллюэна.

Выражаю сердечную благодарность Е.Г. Ландсберг и Л.Г. Ландсбергу за сотрудничество и Т.С. Величкиной и В.Л. Гинзбургу за ценные замечания.

Список литературы

1. Манделъштам Л И *Полное собрание трудов* Т. 5 (М.: Изд-во АН СССР, 1950) с. 416
2. Манделъштам Л И *Ann. Phys. (Leipzig)* **41** 609 (1913); *Полное собрание трудов* Т. 1 (М.: Изд-во АН СССР, 1948) с. 246
3. Smoluchowsky M *Ann. Phys. (Leipzig)* **25** 205 (1908)
4. Einstein A *Ann. Phys. (Leipzig)* **33** 1275 (1910); Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 3 (М.: Наука, 1966) с. 216
5. Einstein A *Ann. Phys. (Leipzig)* **22** 180 (1907); Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 3 (М.: Наука, 1966) с. 134, 253
6. Debye P *Ann. Phys.* **39** 789 (1912)
7. Леонтович М А *Введение в термодинамику. Статистическая физика* § 20 (М.: Наука, 1983) с. 70
8. Фабелинский И Л *Молекулярное рассеяние света* (М.: Наука, 1965)
9. Академик Л.И. Манделъштам. К 100-летию со дня рождения (М.: Наука, 1979)
10. Ландсберг Г С *Избранные труды* (М.: Изд-во АН СССР, 1958)
11. Ландсберг Г С "Молекулярное рассеяние света", в *Юбилейном сборнике* Ч. 1 (М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1947)
12. Манделъштам Л И *ЖРФХО* **58** 381 (1926); *Полное собрание трудов* Т. 1 (М.: Изд-во АН СССР, 1948) с. 280
13. Brillouin L *Ann. Phys. (Paris)* **17** 88 (1922)
14. Mandelstam L *Phys. Z.* **5** 245 (1904)
15. Ландсберг Г С *УФН* **36** 284 (1948)
16. Debye P J, Sears F W *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **18** 409 (1932)

17. Кастлер А *УФН* **106** 101 (1972)
18. Debye P J *Phys. Z.* **33** 849 (1932)
19. Lucas R, Biguard P C. R. *Acad. Sci.* **194** 2132 (1932)
20. Рыгов С М *Изв. АН СССР Сер. физ.* **2** 223 (1937)
21. Рыгов С М *Труды ФИАН* **2** 41 (1940)
22. Харкевич А А *Спектры и анализ* (М. – Л.: Гостехиздат, 1952)
23. Фабелинский И Л *УФН* **164** 897 (1994)
24. Fabelinskii I L "Spectra of molecular scattering of light", in *Progress in Optics* Vol. 37 (Amsterdam: Elsevier, 1997) p. 95
25. Фабелинский И Л *УФН* **126** 124 (1978)
26. Фабелинский И Л *К истории открытия комбинационного рассеяния* (М.: Знание, 1982)
27. Landsberg G S Z. *Phys.* **43** 773 (1927)
28. Strutt R J *Proc. R. Soc. London Ser. A* **95** 476 (1919)
29. Landsberg G S Z. *Phys.* **45** 442 (1927)
30. Landsberg G S, Vulfson K S Z. *Phys.* **58** 95 (1929)
31. Landsberg G S, Mandelstam S L (uni) *Z. Phys.* **73** 502 (1931)
32. Фабрикант В А "Мефистофель", в кн. *Воспоминание об академике М.А. Леонтовиче* (М.: Наука, Физматлит, 1996)
33. Леонтович М А "К истории открытия комбинационного рассеяния света", в кн. *Г.С. Ландсберг: Очерки и воспоминания* (М.: Наука, 1993)
34. Мандельштам С Л "О Г.С. Ландсберге", в кн. *Г.С. Ландсберг: Очерки и воспоминания* (М.: Наука, 1993)
35. Новиков Б В "Жизнь и научная деятельность Евгения Федоровича Гросса", в сб. *Воспоминания о Евгении Федоровиче Гроссе* (Приложения к трудам Конференции "Экситоны в конденсированных средах") (С.-Петербург, 1997)
36. Gross E Z. *Phys.* **63** 685 (1930)
37. Гросс Е Ф "Исследования по оптике и спектроскопии кристаллов и жидкостей", в сб. *Избранные труды* (Л.: Наука, 1976)
38. Mandelstam L, Landsberg G, Leontovich M Z. *Phys.* **60** 334 (1930)
39. Bogros A, Rocard Y J. *Phys. Radium* **10** 72 (1929)
40. Гросс Е Ф *Изв. АН СССР. Сер. Физ.* **4** 44 (1940)
41. Raman C V *Molecular Diffraction of Light* (Kalkutta, 1922); *J. Opt. Soc. Am.* **15** 185 (1927)
42. Гросс Е Ф *Избранные труды* (Л.: Наука, 1976)
43. Gross E *Nature* (London) **126** 201 (1930)
44. Gross E *Nature* (London) **126** 400 (1930)
45. Gross E *Nature* (London) **129** 722 (1932)
46. Леонтович М А, Мандельштам Л И *ДАН СССР* **3** 111 (1936); Мандельштам Л И *Полное собрание трудов* Т. 2 (М.: Изд-во АН СССР, 1948) с.170; Леонтович М А *Избранные труды* (М.: Наука, 1985) с. 195
47. Маш Д И, Старунов В С, Тиганов Е В, Фабелинский И Л *ЖЭТФ* **47** 783 (1964)

The prediction and discovery of Rayleigh line fine structure

I.L. Fabelinskii

*P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Leninskii prosp. 53, 117924 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-095) 135-24 11, 132-63 05*

The prediction of the fine structure of the Rayleigh line by L.I. Mandelstam and L. Brillouin is discussed. Experimental search for the new phenomenon in Moscow and Saint-Petersburg is described. Correspondence between the physicists involved and the results of their work are presented.

PACS numbers: **01.65. + g, 33.20.–t**

Bibliography — 47 references

Received 28 April 1999