

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Комбинационному рассеянию света — 70 лет

И.Л. Фабелинский

Излагается краткая история открытия комбинационного рассеяния света (раман-эффекта). Ландсберг и Мандельштам в Москве впервые наблюдали спектральные линии нового явления в кристаллах 21 февраля 1928 г., а опубликовали свои результаты 13 июля 1928 года, а Раман и Кришнан в Калькутте впервые наблюдали спектральные линии того же явления в жидкостях 28 февраля 1928 года, а опубликовали свои результаты 21 апреля 1928 года. В первой же публикации Ландсберг и Мандельштам дали правильное объяснение явления, которое наблюдали. О причине запоздания их публикации сказано в тексте статьи. Сделано краткое замечание о судьбе открытия и открывших его людей. Нобелевская премия по физике в 1930 году за открытие комбинационного рассеяния света была присуждена только одному Раману. Приведена копия списка выдвинутых и выдвигавших на Нобелевскую премию по физике в 1930 году. Упомянуто о развитии исследований комбинационного рассеяния света и приведено несколько примеров современного использования этого явления для научных и практических целей.

PACS numbers: 01.65. + g, 78.30. - j

Содержание

1. Введение (1341).
 2. Как обнаружили комбинационное рассеяние света. Исследования в Москве (1342).
 3. Обнаружение комбинационного рассеяния света в Калькутте (1344).
 4. Когда было обнаружено комбинационное рассеяние света и было ли оно предсказано (1346).
 5. О судьбе открытия и открывших его людей (1347).
 6. Начало систематического исследования нового явления (1350).
 7. Спектры комбинационного рассеяния света (1351).
 8. Резонансные явления (1353).
 9. Фазовые переходы (1354).
 10. Вынужденное комбинационное рассеяние света (ВКР) (1355).
 11. Использование ВКР для получения низких температур (1356).
 12. Лазеры с большой контрастностью импульса и большой энергией и мощностью излучения (1357).
 13. Мощный лазер на вынужденном комбинационном рассеянии света (1357).
 14. Некоторые характеристики описанного выше ВКР-лазера (1358).
- Список литературы (1359).

1. Введение

Комбинационное рассеяние света (раман-эффект) — одно из самых знаменательных физических открытий

И.Л. Фабелинский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 117924 Москва, Ленинский просп. 53, Россия
Тел. (095) 135-24-11. Факс (095) 938-22-51
E-mail: fabelins@sci.lpi.msk.su

Статья поступила 13 июля 1998 г.

XX века — оказалось необычайно эффективным методом разнообразных исследований в физике, химии, биологии и др. науках.

Комбинационное рассеяние света внесло огромный вклад в изучение строения молекул, межмолекулярных взаимодействий, временной кинетики разных явлений и в том числе химических реакций и частот собственных колебаний отдельных молекул. С появлением лазерных источников света большой мощности были обнаружены новые явления в комбинационном рассеянии света, о которых будет подробнее сказано ниже.

Если говорить кратко и не строго, то явление комбинационного рассеяния состоит в следующем.

Представим себе двухатомную молекулу, например, молекулу водорода H_2 с двумя электронами, составляющими электронную оболочку молекул H_2 . Если представить себе, что избранная молекула не совершает каких-либо движений, то свет, падающий на такую молекулу и описываемый известным выражением для электрического поля $E = E_0 \cos(\omega t)$, будет "раскачивать" электронную оболочку в такт своей частоте ω и наводить в молекуле момент $P = \alpha_0 \cos(\omega t)$ (где α_0 — постоянная), который определит свет, рассеянный во все стороны с частотой возбуждающего света ω . Важно подчеркнуть, что в рассматриваемом случае частота рассеянного света та же, что и частота возбуждающего света.

Однако в действительности описанную картину взаимодействия света с молекулой реализовать нельзя. В реальном случае атомы, составляющие молекулу, будут "дрожать" под действием теплового движения, и для индуцированного момента нужно написать выражение:

$$P(q\omega) = \alpha(q)E_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

где q — обобщенная координата, $\alpha(q)$ — поляризуемость в функции координаты, вообще говоря, тензорная вели-

чина, но для простоты считается скалярной, и здесь не учитывается возможное вращение молекулы.

При малых отклонениях атомов от положения равновесия поляризуемость можно разложить при синусоидальных колебаниях молекулы следующим образом:

$$\alpha(q) = \alpha(0) + \frac{\partial \alpha}{\partial q} q \cos(\Omega t + \varphi). \quad (2)$$

Здесь φ — произвольная фаза, а Ω — частота колебания или, как сказано выше, "дрожания" молекулы.

Если теперь (2) поставить в (1), то после простых преобразований получим

$$\mathbf{P} = \alpha(0)\mathbf{E}_0 \cos \omega t + \frac{1}{2} \frac{\partial \alpha}{\partial q} q E_0 \left\{ \cos[(\omega + \Omega)t + \varphi] + \cos[(\omega - \Omega)t - \varphi] \right\}. \quad (3)$$

Интенсивность и спектральный состав рассеянного света будет определяться наведенным моментом (3), поэтому очевидно, что в рассеянном свете должны присутствовать линии частоты ω , а кроме того еще две линии частоты $\omega - \Omega$ — стоксовая, или "красный" сателлит, и частоты $\omega + \Omega$ — антистоксов или "фиолетовый" сателлит.

Когда Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг на своем негативе увидели картину такого спектра, они ему дали то объяснение, которое приведено выше, и это было правильное объяснение и сегодня сохраняющее свое значение.

В случае более сложной молекулы и даже колебаний в кристаллах приведенное объяснение может быть распространено и на эти более сложные случаи.

Теперь, когда прошло 70 лет со времени открытия этого замечательного явления и оно плодотворно используется в различных отраслях науки, ему посвящены тысячи, а может быть и десятки тысяч работ, написаны десятки толстых монографий и справочников, имеет смысл вспомнить, как все было, с чего начиналось там, где это явление было обнаружено, — в России и в Индии.

О том, как развивались события в России, мы знаем больше, хотя тех, кто принимал участие в работе в лаборатории, уже нет в живых. Автор этой статьи 20 лет проработал в лаборатории Г.С. Ландсберга, слушал Л.И. Мандельштама и даже разговаривал с ним, много лет общался с М.А. Леонтовичем, бывшим тогда лаборантом в оптической лаборатории, а также с С.М. Рытовым — аспирантом Л.И. Мандельштама.

О том, как проходили исследования в Индии, мы знаем меньше. В этом случае наши знания ограничиваются тем, что публиковал сам Раман и другие индийские физики.

Об истории открытия комбинационного рассеяния написано довольно много и даже автор этой статьи специально писал об этом дважды [1, 2]. Интересные материалы можно найти также в книгах воспоминаний о Л.И. Мандельштаме [3], Г.С. Ландсберге [4], М.А. Леонтовиче [5].

И все-таки 70-летие со дня открытия этого замечательного физического эффекта заслуживает того, чтобы вспомнить, как к нему шли и что о нем тогда говорили.

2. Как обнаружили комбинационное рассеяние света. Исследования в Москве

В России изучением рассеяния света начали заниматься по инициативе Л.И. Мандельштама, приглашенного в Московский государственный университет (МГУ) на физический факультет заведовать кафедрой теоретической физики. Л.И. Мандельштам принял предложение, переехал в Москву¹. Это было в 1925 году. В то время на физфаке МГУ уже работал Г.С. Ландсберг, который стал сотрудником и другом Л.И. Мандельштама. Л.И. формулирует экспериментальную задачу обнаружения тонкой структуры в спектре света, рассеянного твердым телом, вызванной модуляцией рассеянного света упругими тепловыми волнами. Это те самые тепловые волны, энергия которых равна кинетической энергии теплового движения частиц среды. Число таких волн огромно, оно равно числу степеней свободы частиц $3N$ в образце, а их частоты простираются от 0 до максимальной частоты $v/d \sim 10^{13}$ Гц (здесь v — скорость звука, а d — межатомное расстояние).

В рассеянном свете, например, проявляются волны частоты $\sim 10^{10}$ Гц при угле рассеяния $\theta \cong 90^\circ$. Поэтому расстояние между компонентами искомой тонкой структуры должно быть очень мало. Так, при наблюдении рассеянного света под прямым углом к возбуждающему свету линии дублета должны отстоять друг от друга приблизительно на 7×10^{-2} Å. Это очень малое смещение, но оно может быть обнаружено.

Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг ставят перед собой задачу обнаружить тонкую структуру в спектре рассеянного света в кристаллах.

Коэффициент рассеяния в лучшем природном кристалле, а таким, по-видимому, можно считать монокристалл кварца, составляет 10^{-8} от возбуждающего света. Поэтому любое постороннее включение или свиль маскирует свет молекулярного рассеяния, и в таком случае спектр рассеянного света наблюдать невозможно.

Прежде всего нужно было найти такой монокристалл кварца, в котором можно уверенно найти молекулярное рассеяние света. Эта тяжелая задача легла, главным образом, на плечи Г.С. Ландсберга.

В те далекие годы не было центра, куда можно было пойти и отобрать нужный образец кварца. Тогда из кварца (горный хрусталь), случайно попавшего к мастеру, делались печати, на которых гравировались имя и герб или другие знаки владельца. Письмо запечатывалось расплавленным сургучом. Расплавленный сургуч подвергался натиску кварцевой печати. Кварц не лопался от высокой температуры, а печать из кварца была красивой вещью.

¹ После исключения Л.И. Мандельштама из Новороссийского университета в 1899 году в связи со студенческими волнениями он продолжает свое образование в Страсбурге, а затем там же работает на кафедре Ф. Брауна. В 1915 году — Л.И. уже в Петербурге на инженерной работе. В 1917 году избран профессором физики Тифлисского политехнического института. В 1922 году — он консультант радиолaborатории в Москве. В 1924 году вместе с радиолaborаторией он переезжает в Ленинград.

С 1925 года и до самой смерти в 1944 году Леонид Исаакович Мандельштам работает на физическом факультете Московского университета.

После революции 1917 года такие печати перестали быть необходимой вещью, а красивые печати попали в антикварные магазины как побрякушки. Вот там Г.С. Ландсберг скупал эти печати, нес их в лабораторию, помещал в иммерсию и в темноте в сильном луче выбирал лучший участок образца, чтобы изучить молекулярное рассеяние света. Фотография одной из таких печатей приведена в моих уже опубликованных статьях [1, 2].

Представляет несомненный интерес высказывание Г.С. Ландсберга [6] о том, как обстояло дело, которым он сам с успехом занимался.

"Исторически дело сложилось так. Когда Л.И. Мандельштам занял в 1925 году кафедру Московского университета, он выдвинул в качестве первой экспериментальной проблемы по оптике задачу об исследовании тонкой структуры рассеянного света в кристаллах. В 1925 году сам факт молекулярного рассеяния в кристаллических телах не был установлен достаточно надежно. Поэтому необходимо было начать изучение рассеяния света в кристаллах с самого начала. Только, когда мною была решена задача — установление молекулярного характера наблюдаемого рассеяния и найдены критерии, позволяющие отличить молекулярное рассеяние от рассеяния на случайных включениях в кристалле, оказалось возможным приступить в 1927 году к основной задаче".

Как следует из сказанного в разделе 2, для решения "основной задачи" требовались интерференционные или дифракционные спектрометры высокой разрешающей силы. В распоряжении же Л.И. Мандельштама и Г.С. Ландсберга были посредственный спектрометр и пластинка Льюммера — Герке.

Разумеется, они не намеривались на плохоньком спектрографе так просто обнаружить искомый эффект, но у них была другая идея и Г.С. Ландсберг [7] говорит о ней. Возбуждение рассеяния в кварце осуществлялось резонансной линией ртутного спектра $\lambda 2536,5 \text{ \AA}$. Если на пути рассеянного света поместить резонансный фильтр (сосуд с парами ртути, давление которых можно менять нагревом), то можно целиком поглотить рассеянный свет несмещенной частоты и обнаружить свет измененной частоты. Это можно обнаружить даже на плохоньком спектрографе.

Подыскание подходящих образцов кварца и их изучение было закончено Г.С. Ландсбергом и им совместно с его учениками К.С. Вульфсоном и С.Л. Мандельштамом (мл.) уже в первой половине 1927 года. Публикации сделаны в *Zeitschrift für Physik* (см. литературу в [1]) и Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг приступают к "основной задаче" — поиску изменений в спектре рассеянного света, о чем сказано выше.

При длительных экспозициях они наблюдали в окрестности разных спектральных линий дополнительные линии — сателлиты, особенно интенсивные в окрестности резонансной линии $\lambda 2536,5 \text{ \AA}$. Причем наблюдались как стоксовы, так и антистоксовы сателлиты. Таких линий в спектре возбуждающего света не было. Спектральное смещение сателлитов было огромным по сравнению с ожидаемым. Наблюдавшееся явление было неожиданным и удивительным. Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг были необычайно основательными исследователями. Наблюдение сателлитов потребовало новых и обширных исследований, чтобы доказать, что

сателлиты — это реальные линии в спектре рассеянного света, а не блики, например, или еще что-нибудь в этом роде.

Начались разнообразные опыты. В частности, чтобы отвергнуть предположение о том, что наблюдаемые сателлиты — это не блики, на пути рассеянного света к спектрографу ставили резонансный фильтр. Возбуждающая линия спектра ослаблялась так, что не могла давать блики, а сателлиты оставались по-прежнему.

На фотографии спектра с экспозицией 15 ч виден только стоксов сателлит у резонансной линии (см. фотографию негатива от 23–24/II 1928 г. в [1, 2]).

Существует переписка между почетным академиком профессором О.Д. Хвольсоном и Л.И. Мандельштамом о том, когда впервые были наблюдаены новые линии в спектре света, рассеянном в кварце [1, 2]. Поэтому достоверно известно, когда Ландсберг и Мандельштам впервые увидели сателлиты в получаемых спектрах.

Точно известно, что на сохранившемся негативе в спектре рассеянного света с экспозицией 15 ч у резонансной линии $\lambda 2536,5 \text{ \AA}$ был зарегистрирован стоксов сателлит. На негативе рукой Г.С. Ландсберга была сделана надпись: "23–24/II 1928 г.". Этот негатив воспроизведен в обеих моих публикациях [1, 2].

Знакомясь детально со всеми имеющимися материалами, у меня создалось впечатление, что сателлиты в спектре рассеянного света они могли видеть во второй половине 1927 года. В крайнем случае, в конце 1927 года.

Дело в том, что появление сателлитов в спектре рассеянного света, на три порядка отличающихся по изменению длины волны от того, что ожидалось, было неожиданным и удивительным настолько, что они, по видимому (это мое предположение), приняли вначале сателлиты — линии комбинационного рассеяния за блики. И принялись устранять причину "бликов", размещая резонансный фильтр на пути рассеянного света в спектрографе. Создание в 1927–1928 годах резонансного фильтра, разумеется, потребовало много времени. Но исключительная требовательность к себе и любые затраты времени и сил не останавливали их ради получения достоверных результатов опыта.

Вот как они сами говорят о том, какой опыт убедил их в том, что они наблюдают новое явление [8a]: "Следующий опыт представляется нам решающим, между рассеивающим кварцевым кристаллом и щелью спектрографа помещался кварцевый сосуд, наполненный парами ртути, который целиком поглощал свет с длиной волны $2536 \text{ \AA}$. На спектрограмме мы не получили этой линии, а получили только сателлиты".

С самого начала экспериментальных исследований они понимали, что наблюдают не то, что хотели найти первоначально. В первой публикации [8a] говорится следующее: "При исследовании молекулярного рассеяния света в твердых телах, предпринятого нами для выяснения вопроса о том, происходит ли изменение длины волны, которую можно было бы ожидать, исходя из дебаевской теории теплоемкости, мы нашли новое явление, которое, как нам кажется, представляет определенный интерес. Это явление состоит в изменении длины волны, величина которого, однако, другого порядка, чем мы ожидали, и которое имеет совсем другое происхождение".

Там же дается правильное объяснение нового явления на языке квантов: "Одно из возможных теоретических

объяснений состоит, может быть, в следующем: при рассеянии света могут возбуждаться некоторые собственные инфракрасные частоты кварца за счет убыли энергии рассеянного света. Тем самым энергия рассеянного кванта, и, следовательно, его частота будет уменьшена на величину собственного инфракрасного кванта. Если исходить из частоты, которая соответствует длине волны $\lambda = 20,7$ мкм, то получится хорошее согласие между вычисленными и измеренными величинами".

В феврале 1928 года уже все было ясно, и даже такие осторожные и не торопившиеся с публикациями физики, какими были Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам, могли спокойно публиковать свои результаты. Однако их первая публикация отправлена в журнал *Naturwissenschaften* только 6 мая 1928 года (журнал вышел в свет 13 июля 1928 года).

Причина, по которой произошла задержка между открытием нового явления и публикацией о нем, к физике никакого отношения не имеет.

Дело в том, что как раз в это время (15 марта 1928 года) арестовали Л.И. Гуревича, родственника Л.И. Мандельштама, и оказалось, что Леонид Исаакович эффективнее других мог разобраться в этом деле и способствовать освобождению человека.

Физические исследования и все, что имеет к ним отношение приостановилось, и Л.И. должен был заняться другой областью человеческой деятельности.

Когда это юридическое дело было закончено, можно было приступить к продолжению работы и к публикации достоверных результатов, но времени уже прошло много.

Следующая обширная статья о детальном исследовании спектров комбинационного рассеяния в кварце и в исландском шпате опубликована в *Z. Phys.* [86]. Эта работа уже имеет современный вид и представляет собой полную картину спектров и их объяснений.

Следует подчеркнуть, что Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам с первой своей публикации имели совершенно правильное представление о природе явления, которое открыли, и дали ему адекватное квантовое и классическое описание. Они не только поняли происхождение стоковых и антистоковых компонент, но и дали им правильную интерпретацию и даже количественное выражение для интенсивности компонент, а именно,

$$I_s = A \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu'}{k_B T}\right) \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$I_{as} = A' \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu'}{k_B T}\right) \right]^{-1} \exp\left(-\frac{h\nu'}{k_B T}\right). \quad (5)$$

Здесь $A/A' = [(v - v')/(v + v')]^4$, v' — частота сателлита, v — частота возбуждающего света, k_B — постоянная Больцмана,

$$\frac{I_s}{I_{as}} = \frac{A}{A'} \exp\left(\frac{h\nu'}{k_B T}\right). \quad (6)$$

Эти формулы являются количественным выражением их словесного описания, уже содержащегося в первых работах [86], и, таким образом, их представления в основе своей не отличаются от современного представления.

В первых же работах [8а] подчеркивается, что положение в спектре линий комбинационного рассеяния, или сателлитов, разное для разных веществ, и, следовательно,

но, они характеризуют особенности вещества, в котором рассеивался свет.

Это существенное наблюдение оказалось совершенно справедливым и, в первую очередь, эта особенность явления так много дала для определения строения молекул и в ряде других применений комбинационного рассеяния света.

3. Обнаружение комбинационного рассеяния света в Калькутте

В Индии исследованиями рассеянного света занимались еще до 1925 года, но судить о том, как они развивались, можно только по тому, что писали сами исследователи, и по тому, что их коллеги писали об исследовании и исследователях. Поэтому описание того, что делалось в Калькутте, не может быть сделано с желаемой полнотой. Насколько можно судить, Ч.В. Раман и К.С. Кришнан [9–12] искали в спектре рассеянного света линии измененной частоты вследствие оптического аналога эффекта Комптона. В своей инаугурационной речи Раман [22] следующим образом говорит о своих мыслях: он рассказывает, как доктор Раманатан и мистер Кришнан исследовали 80 различных жидкостей и в каждой из них находили, по их мнению, слабую люминесценцию.

"Мощный стимул к дальнейшему исследованию, — говорит Раман, — возник, когда у меня зародилась мысль, что этот эффект был некоторым видом оптического аналога рассеяния рентгеновских лучей, открытых профессором Комптоном², за которое он недавно получил Нобелевскую премию по физике. Я немедленно предпринял экспериментальную перепроверку явления в сотрудничестве с мистером Кришнаном".

Отметим, что комптоновская длина волны λ_C не зависит от вещества, но зависит от угла рассеяния θ и массы частицы m . Комптоновская длина волны для электрона $\lambda_C = 2,4 \times 10^{-10}$ см ($2,4 \times 10^{-2}$ Å), а для протона $\lambda_C^p = 1,3 \times 10^{-13}$ см ($1,3 \times 10^{-5}$ Å). Для молекул эта величина может быть в тысячи раз меньше.

Такое ничтожное изменение длины волны в оптическом спектре так просто нельзя зарегистрировать. Возможно, что Раман не знал теории эффекта Комптона, а аналогия с комптоновским изменением длины волны напрашивается.

Такой представляется автору ситуация и такова идея Рамана, которая руководила им, когда он приступил к экспериментальному исследованию рассеяния света в жидкостях и парах.

В первой публикации Рамана и Кришнана [9], датированной 16 февраля 1928 года и опубликованной в *Nature* 31 марта 1928 года, описаны опыты, в которых источником света служило Солнце, поэтому никаких линий в рассеянном свете наблюдать не могло. Но экспериментаторы применили метод скрещенных светофильтров. Их опыты дали результаты, позволяющие им утверждать, что свет измененной частоты обнаруживается.

² Эффект Комптона состоит в том, что при рассеянии рентгеновских лучей на свободных электронах или на практически свободных электронах в рассеянном свете будут присутствовать фотоны первоначальной и меньшей энергии. Фотоны с увеличенной длиной волны отличаются от первоначальной на величину комптоновской длины волны $\lambda_C = [h/(cm)](1 - \cos \theta)$, где h , m , c — постоянная Планка, масса электрона и скорость света, θ — угол рассеяния.

Во второй публикации Рамана и Кришнана [10] указывается, что помимо солнечного света использовался также свет ртутной лампы. В спектре рассеянного света наблюдались линии. Эта работа датирована 8 марта и опубликована в *Nature* 21 апреля 1928 года. О наблюдавшихся спектральных линиях сказано следующее: "Предварительные визуальные наблюдения показывают, что положение основных измененных линий одно и то же для всех веществ, тогда как их интенсивность и сплошной спектр меняется с изменением химической природы вещества". Возможно, этот ошибочный вывод дал авторам основание назвать свою статью "Оптический аналог комптон-эффекта". Подтверждения в эксперименте независимости положения сателлитов от вещества нет, но полагать, что это так, соблазнительно и, более того, Раман и Кришнан полагают, что антистоксовы сателлиты есть результат отрицательного поглощения, предсказанный Эйнштейном.

Действительно, в [11] Раман и Кришнан пишут следующее об антистоксовых сателлитах: "Наличие этих линий доказывает одновременно и наличие в жидкостях молекул, находящихся на возбужденных энергетических уровнях, и факт, что падающее излучение индуцирует возврат в состояние с более низкой энергией; другими словами, имеется отрицательное поглощение излучения".

Они были так уверены в правильности своих представлений, что даже заглавие статьи в *Nature*, датированной 15 мая 1928 года и опубликованной 7 июля 1928 года, гласило: "Отрицательное поглощение излучения". Разумеется, страстное желание то увидеть в результатах своего опыта эффект Комптона для света, то принять антистоксовы компоненты за свидетельство отрицательной абсорбции, могло означать только то, что Раман и Кришнан, во всяком случае, до мая – июня 1928 года не понимали истинной природы явления, которое наблюдали в своих опытах.

Казалось, что статья Ландсберга и Манделъштама [8a], датированная 6 мая и опубликованная 13 июля 1928 года, в которой сообщалось об открытии комбинационного рассеяния в кварце и исландском шпате и в которой дано совершенно правильное объяснение этого явления, могла бы прояснить Раману и Кришнану природу того же явления, наблюдавшегося ими в жидкостях.

Однако почему-то этого не происходит. Дело в том, что на 6-м съезде ассоциации русских физиков присутствовал С.Г. Дарвин, который опубликовал в *Nature* в октябре 1928 года [13] свои впечатления о съезде объемом около 2/3 страницы и посвященные, главным образом, чисто внешним впечатлениям. Что же касается его оценки научных докладов русских ученых, то он пишет следующее:

"Возможно, наиболее интересные работы принадлежат проф. Иоффе об отражении электронов, включая неудачную попытку обнаружить поляризацию, и профессорам Манделъштаму и Ландсбергу. Эта последняя работа описывает, как они независимо открыли рамановское явление — рассеяние света с изменением частоты. Это было предсказано несколько лет тому назад в теории дисперсии Крамерса (и несколько раньше Смекалем) и подтверждение было получено при рассеянии в твердом теле и жидкости и наблюдалось изменение частоты.

Это изменение является мерой длины волны инфракрасного поглощения рассеивающего вещества и, таким образом, помимо интереса явления самого по себе, явление обещает быть существенным в спектроскопии твердого тела".

Таким образом, и в заметке Дарвина содержится и правильная оценка явления, открытого Раманом и независимо Ландсбергом и Манделъштамом, и правильное его объяснение. Цитированная заметка Дарвина [13] по содержанию совпадает с заметкой Борна [14] по этому же поводу. Казалось, все выяснено, но в качестве ответа Дарвину в *Nature* 12 января 1929 года появляется статья Рамана [15]. В этой статье делается странное утверждение, что будто бы хорошо известно, что существование измененной длины волны в рассеянном свете установлено еще в 1923 году в исследованиях, сделанных в Калькутте. Далее говорится: д-р Раманатан [16] показал, что когда фиолетовый свет проходит через тщательно очищенную воду или алкоголь, заметное количество радиации в зеленой части спектра присутствует в рассеянном свете. Дальнейшее изучение эффекта в других объектах описано Кришнаном [17] и Раманом [18].

Данное здесь описание наблюдений Раманатана и Кришнана отчетливо показывает, что наблюдалась стоксова люминесценция, а что касается работы Кришнана [17], то она посвящена измерению степени деполаризации и интенсивности света, рассеянного в 65-ти тщательно очищенных от пыли жидкостях. В некоторых жидкостях наблюдалась флюоресценция, и автор работы отчетливо понимает, что это флюоресценция, а не комбинационное рассеяние света, о котором пишет Дарвин [13]. Что же касается флюоресценции, то ее изучение началось не в 1923 году в Калькутте, а как указывает С.И. Вавилов [19]: "Научное изучение люминесценции насчитывает около 400 лет. Исследователем люминесценции был еще Галилей".

Вызывает крайнее недоумение высказывание, что изменение частоты в рассеянном свете наблюдалось с 1923 года в работах, выполненных в Калькутте. Означает ли такое утверждение непонимание различия между люминесценцией или флюоресценцией и комбинационным рассеянием света?

По-видимому, обсуждаемая заметка Рамана в *Nature* в январе 1929 года [15] написана ради последнего абзаца, в котором есть утверждение: "Русские физики, на чьи наблюдения эффекта в кварце ссылается проф. Дарвин, сделали свое первое сообщение об этом предмете после публикации заметки в *Nature* от 31 марта и 21 апреля.

Их статья появилась в печати после шестнадцати других публикаций об этом эффекте разными авторами в научной периодике".

Ни на одну из 16-ти будто бы сделанных публикаций нет ни одной ссылки. Эти публикации неизвестны также Борну [14] и Дарвину [13], которые, по-видимому, знали литературу лучше экспериментаторов; в частности, Дарвин указал на предсказания эффекта Смекалем и Крамерсом, чего авторы открытия не знали.

По-видимому, заметка Рамана [15] в *Nature* есть не только акт борьбы за приоритет, но и претензия на исключительность своего опыта. Видимо, он полагал, что все остальные только повторяют его опыты.

Разумеется, это не так, и подтверждением тому может служить высказывание Резерфорда [20], тогда главы Королевского физического общества, сделанное после

публикации Рамана [15]. Резерфорд так говорит об опытах Рамана, Ландсберга и Мандельштама: "Отличное сообщение об этих прекрасных экспериментах было дано в этом году в наших "Трудах" Раманом и Кришнаном. Подобный эффект был обнаружен Ландсбергом и Мандельштамом при исследовании рассеянного света обычными кристаллами. Эти опыты нелегки, потому что рассеянный свет ничтожной интенсивности, и нужны длительные экспозиции с интенсивными источниками света, чтобы выявить относительно слабые новые линии. Изучение результатов показало, что изменение частот спектральных линий зависит от характеристик частот молекулы, связанных с ее колебательным состоянием".

Уже тогда в 1928–1930 годах было ясно, что Раманом и Ландсбергом и Мандельштамом обнаружено одно и то же явление в одно и то же время и независимо друг от друга. Однако вопрос о толковании природы нового явления Раманом и Кришнаном пока остается не ясным.

Нам трудно определить, когда Раман отказался от своих ошибочных представлений о природе наблюдаемого им явления комбинационного рассеяния света. Нам также неизвестно, пришел ли он к правильному пониманию природы явления самостоятельно или под влиянием других публикаций и, в частности, публикаций французских авторов (см. литературу в [1]). Эти последние, увидев смещенные компоненты, по-видимому, сразу сообразили, что это комбинационное рассеяние света: ведь они именно это явление пытались обнаружить в газообразном состоянии вещества, да жаль, что им не хватило интенсивности возбуждающего света.

4. Когда было обнаружено комбинационное рассеяние света и было ли оно предсказано

Не так уж редко бывает, что какой-нибудь вопрос, еще не решенный, или какое-нибудь явление, еще не открытое, долго не привлекавшее внимание, вдруг становится объектом исследования сразу нескольких человек или даже нескольких групп в самых разных местах. Так было с комбинационным рассеянием света. В меру нашей осведомленности, выше кратко было рассказано, как развивались исследования в Москве и в Калькутте, а теперь интересно выяснить, когда впервые было обнаружено новое явление в Москве и в Калькутте? На этот вопрос нужно искать ответ у тех, кто открывал одно и то же явление в одно и то же время совершенно независимо друг от друга, разделенные расстоянием более 7000 км. Орест Данилович Хвольсон, по-видимому, подготавливая 4-е издание своей книги "Физика наших дней" [21], письменно спрашивает Л.И.Мандельштама: "Не можете ли Вы указать время, когда Вы впервые увидели новые линии? Я пишу статью и мне было бы очень важно получить эти сведения". (В упомянутой книге Хвольсона есть параграф 3 главы 7, который так и называется: "Явление Рамана, Мандельштама и Ландсберга".)

Л.И. Мандельштам отвечает О.Д. Хвольсону следующее: "В первый раз мы обратили внимание на появление новых линий 21 февраля 1928 года. На негативе от 23–24 февраля (экспозиция 15 часов) новые линии были видны уже ясно". Это определенный и ясный ответ на поставленный вопрос.

Не менее ясный ответ на тот же вопрос можно получить и от Рамана [22], который в своей инаугура-

ционной речи говорит следующее: "Линия спектра нового излучения была в первый раз наблюдаена 28 февраля 1928 года. Наблюдение было предано гласности (was given publicity) на следующий день".

На 6-й Международной конференции по спектроскопии комбинационного рассеяния в Бангалоре (Индия) в 1978 году, посвященной 50-летию открытия явления, в своем докладе Бхагавантам говорит следующее: "То, что сам исследователь называл "новое излучение", когда он открыл его, и то, что вскоре стало известно, как "эффект Рамана", было впервые наблюдало профессором Раманом в Калькутте на улице Бов Базар 210 в лаборатории Индийской ассоциации развития науки вечером 28 февраля 1928 года. Первое публичное сообщение было сделано в ежедневной газете Калькутты, датированной 29 февраля" [22a].

Почти как у наших актеров, выступающих на злободневную тему, "утром в газете — вечером в куплете".

Стиль исследований и подход к публикации своих результатов настолько различаются у Ландсберга и Мандельштама и у Рамана и Кришнана, что нет никакой возможности их сравнивать.

Первое наблюдение нового явления русскими физиками было сделано на неделю раньше, чем индийскими физиками. Но первая публикация о новом явлении Раманом и Кришнаном (работа, где наблюдались новые линии) была опубликована в *Nature* 21 апреля 1928 года, а Ландсберг и Мандельштам опубликовали свои результаты в *Naturwissenschaften* только 13 июля 1928 года.

Выше, отчасти, объяснена причина, замедлившая окончание исследований русских физиков. Но не будь даже приключившегося несчастного случая, все равно, я думаю, публикация русских физиков была бы сделана позже публикации индийских.

Ландсберг и Мандельштам после написания статьи долго обсуждали ее, стараясь так ее отшлифовать, чтобы ни одна фраза не могла быть истолкована не так, как хотели авторы, и чтобы любая фраза была однозначной и выражала мысль ее авторов и ничего другого. Иногда готовая работа откладывалась, чтобы обсудить ее снова. Результаты измерений и наблюдений должны быть достоверными.

К середине 1928 года уже было совершенно ясно, что эффект комбинационного рассеяния, обнаруженный в России в кварце и в исландском шпате и в Индии в ряде жидкостей, — это одно и то же явление. Летом 1928 года в России состоялся 6-й съезд ассоциации русских физиков. Съезд был многочисленным и представительным. В нем принимали участие 400 человек, в том числе 21 иностранный физик. Среди иностранных физиков были Борн, Бриллюэн, Дарвин, Дебай, Дирак, Поль, Принсгейм, Ф. Франк, Шелл и другие.

Съезд открылся в Москве 5 августа 1928 года, затем участники съезда поехали в Нижний Новгород, а оттуда на пароходе вниз по Волге. Съезд закончил работу в Саратове 15 августа 1928 года.

Об этом съезде в восторженных тонах были написаны статьи Борном [14] в *Naturwissenschaften* и Дарвином [13] в *Nature*. М. Борн в своем отчете писал: "Явление, открытое Ландсбергом и Мандельштамом на кристаллах по существу своему тождественно с эффектом, который был наблюден Раманом и его сотрудником Кришнаном в жидкостях; русская физика вправе гор-

даться тем, что это важное открытие было сделано московскими исследователями независимо от работ индусов и почти одновременно с ними (20 февраля 1928 г.). Это совпадение служит еще одним доказательством интернациональности нашей науки, охватившей теперь весь мир".

Из сказанного видно — никак нельзя сказать, что экспериментальные достижения наших физиков оставались неизвестными.

Возникает вопрос, было ли открытие комбинационного рассеяния света случайным или оно было предсказано, а затем открыто? Поскольку Ландсберг и Мандельштам искали то, что теперь называется эффектом Мандельштама — Бриллюэна, а Раман и Кришнан искали оптический аналог эффекта Комптона, то можно определенно сказать, что нашли они совсем не то, что искали, т.е. комбинационное рассеяние света (раман-эффект) было открыто случайно.

Мне представляется, что по большей части самые крупные открытия делаются случайно. Например, такое крупнейшее открытие, как электромагнитная индукция, было сделано Фарадеем случайно, а оно определило уровень современной цивилизации. Разумеется, не только оно, но и оно тоже.

Казалось бы, открытия можно разделить на две группы: случайные и предсказанные. Необычайность описываемой ситуации состоит в том, что, строго говоря, комбинационное рассеяние света (КРС) не подпадает ни к одной из двух групп.

Дело заключается в следующем: КРС было предсказано в 1923 году А. Смекалем [23], который исходил из элементарных квантовых представлений, состоящих в следующем: если фотон "поднимает" атом на более высокий уровень, то фотон затрачивает энергию ΔE , что эквивалентно понижению частоты на $\Delta E/h$ и, следовательно, помимо частоты ν будет также свет с частотой $\nu - \Delta E/h$. В том случае, когда атом отдает свою энергию ΔE фотону, будет присутствовать частота $\nu + \Delta E/h$.

Это интересная и существенная работа Смекаля так ясно указывала на возможность наблюдать в рассеянном свете дополнительные частоты, что она вдохновила Крамерса и Гейзенберга [24] рассмотреть задачу более детально. Работа Крамерса и Гейзенберга была послана в печать 5 января 1924 года и опубликована в 1925 году еще до создания квантовой механики.

Крамерс и Гейзенберг использовали принцип соответствия, который, коротко говоря, состоит в том, что вещество рассматривается с квантовой точки зрения, а излучение — чисто классически [24–26]. Пользуясь обозначениями [26], формулу Крамерса и Гейзенберга можно представить следующим образом через сечение рассеяния $d\sigma$:

$$d\sigma = \frac{\omega\omega'^3}{\hbar^2 c^4} \left| \sum_n \left\{ \frac{(d_{2n}l'^*)(d_{n1}l)}{\omega_{n1} - \omega - i\Omega} + \frac{(d_{2n}l)(d_{n1}l'^*)}{\omega_{n1} + \omega' - i\Omega} \right\} \right|^2 d\Omega, \quad (7)$$

где $\hbar\omega_{n1} = E_n - E_1$; d_{n1} и d_{n2} — величины, пропорциональные матричным элементам.

Интенсивность рассеянного света $dI \sim d\sigma$ пропорциональна сечению.

Работа Крамерса и Гейзенберга дала возможность не только констатировать наличие в рассеянном свете стоковых и антистоковых сателлитов, но и, по крайней мере в принципе, вычислить их интенсивности.

Теперь, когда теория колебаний кристаллической решетки, развитая Борном и Карманом [27] еще в 1912 году, излагается в любом курсе теоретической физики (см., например, [28]) и из которой следует, что, если кристаллическая решетка состоит из N частиц, связанных квазиупругой силой, то оказывается, что будут два вида дисперсионных кривых (зависимость частоты упругих колебаний от длины волны λ или волнового числа $k = 2\pi/\lambda$). Акустическая, или дебаевская, будет состоять из трех ветвей: одна для продольной волны и две для поперечных упругих волн. Акустические частоты могут начинаться от нуля и простираются до максимальной частоты $f_{\max} = v/d$, где v — скорость звука, d — межатомное расстояние. Другая ветвь называется оптической, или борновской. Частоты оптической ветви высокие ($\sim 10^{12} - 10^{13}$ Гц).

Из сказанного следует, что Ландсберг и Мандельштам в своей первоначальной работе искали модуляцию рассеянного света акустическими волнами, а нашли результат модуляции рассеянного света оптическими волнами — комбинационное рассеяние света [29].

Возникает естественный вопрос: почему они сразу не искали модуляцию рассеянного света частотами борновской ветви? Сейчас некому из принимавших в работе участие в Москве ответить на этот вопрос (всех участников этой работы в Москве уже нет в живых).

Точного ответа на этот вопрос мы никогда не получим. Мое мнение, возможно неправильное, состоит в том, что Раман, так же как Ландсберг и Мандельштам, просто не знали работ Борна и Кармана (1912 год), Смекаля (1923 год), Крамерса и Гейзенберга (1925 год).

5. О судьбе открытия и открывших его людей

Почти все крупные открытия, как сказано, делаются случайно. Случаи эти бывают разнообразными. Легче всего убедиться в этом по экспериментальным исследованиям и увидеть, что чаще других — это случай, когда ищут одно, а находят другое, и это другое оказывается значительней, чем то, что искали. Прекрасным примером этому является комбинационное рассеяние света, одно из крупнейших открытий XX века.

Теперь, когда уже прошло 70 лет со времени открытия явления, можно в общих чертах говорить и о судьбе открытия, и о судьбе людей, открывших тогда новое явление.

Ландсберг и Мандельштам в России и Раман в Индии открыли одно и то же явление, это было ясно уже тогда, в 1928 году. То, что Ландсберг и Мандельштам увидели новое явление на неделю раньше Рамана и Кришнана, а опубликовали свое сообщение на два месяца и 21 день позже, имеет значение для установления времени публикации, но не имеет никакого значения в оценке ценности вклада в науку.

Вклад Ландсберга и Мандельштама в науку очень велик — они не только открыли новое явление совершенно независимо от Рамана, но и сразу поняли его природу, дали его теоретическое описание, справедливое и сегодня.

Между тем Раман долгое время не понимал природы явления, которое он наблюдал, то полагая его оптическим аналогом эффекта Комптона [10], то приписывая

антистоксовым сателлитам проявление отрицательного поглощения света [11].

Явление комбинационного рассеяния света оказалось чрезвычайно плодотворным. Оно обогатило многие области физики, химии, биологии и сыграло заметную роль в других областях науки и техники. Об этой стороне дела кратко будет сказано ниже, но уже сейчас вполне определенно можно заключить, что судьба открытия во всех указанных областях была значительной и, пожалуй, ничего лучшего желать не следует.

Судьба авторов открытия была совершенно различной в той мере, в какой она была связана с открытием комбинационного рассеяния света. Начать с того, что само явление называется "раман-эффект", хотя было бы справедливо назвать его, как это сделал О.Д. Хвольсон [21] в своей книге, "эффект Рамана, Мандельштама и Ландсберга", но так не случилось.

Другое различие в судьбе авторов открытия связано с ошибкой Нобелевского комитета, присудившего премию за 1930 год только одному Раману, хотя Ландсберг и Мандельштам за ту же работу на премию выдвигались, а присуждение Нобелевской премии троим возможно по правилам Нобелевского комитета и есть примеры тому в практике.

Характерна реакция Рамана на сообщение о присуждении ему Нобелевской премии, как об этом рассказал Бхагавантам в докладе на 6-й Международной конференции по спектроскопии комбинационного рассеяния в Бангалоре (Индия) в 1978 году.

"Я имел честь быть одним из его активных сотрудников в то время, когда ему была присуждена Нобелевская премия по физике, и я отчетливо помню его реакцию, когда я сообщил ему первую весть о присуждении, после того, как сам узнал по телефону от одного индийского Агентства новостей в Калькутте. Он спросил меня, присуждена ли премия ему одному или он должен разделить кровать с другими иностранцами. Такие черты, как обилие эмоциональности, часто создавали ему репутацию человека бестактного в обращении с людьми.

За два месяца до того, как он узнал о присуждении ему Нобелевской премии, он действовал сверх дерзко (*Supreme audacity*), купил билет на пароход, чтобы не опоздать на церемонию в Стокгольме" [22a].

Конечно, Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам — люди и, думаю, они испытывали чувство досады, что не получили вместе с Раманом заслуженную ими Нобелевскую премию. Но за двадцать лет моей работы в лаборатории Ландсберга я ни единым словом, движением или вздохом его не ощутил выражения чувства досады или обиды по поводу свершившейся несправедливости. То же относится и к Мандельштаму.

Недавно В.Л. Гинзбург [30] в статье "Почему советские ученые не всегда получали заслуженные ими нобелевские премии" разбирает вопрос о Ландсберге и Мандельштаме и Рамане, а также о похожем случае с химиком В.Н. Ипатьевым. На вопрос, поставленный в заглавии [30], не так просто дать однозначный ответ, но со взглядом на этот вопрос в целом, высказанный В.Л. Гинзбургом, можно согласиться.

Слухи, которые часто приходилось слышать, что премия будто бы не была присуждена нашим соотечественникам потому, что Нобелевскому комитету не нравился советский строй, не выдерживают критики и, полагая, должны быть отброшены.

По прошествии 50-ти лет после присуждения премий Нобелевский комитет публикует некоторые материалы, среди которых состав Нобелевского комитета, кто может выдвигать на премию; список выдвинутых по годам; список выдвигавших и их положение; кто исключен из выдвинутых и по какой причине; список Нобелевских лауреатов по физике и по химии за 1900–1937 годы. Такие материалы в первый, и пока единственный раз, были опубликованы в 1987 году [31].

Поскольку о Нобелевских премиях, присужденных и не присужденных, часто приходится слышать всякие небылицы, имеет смысл поместить здесь точные копии списков людей, выдвинутых на премию в 1930 году, список тех, кто выдвигал, и те характеристики, которые значатся в этих списках, а также таблицы 6 и 7, в которых даны необходимые пояснения [31].

Представляет также общий интерес состав Нобелевских комитетов по физике и химии, хотя эти данные непосредственного значения для предмета нашей статьи не имеют.

На страницах 120–123 книги [31] приведен список выдвинутых на премию по физике в 1930 году.

Заголовок списка гласит: 1930; Список выдвинутых по физике. Получивший премию (призер) Раман Ч.В. В первом столбце приведен список выдвинутых (*Nominee*) в алфавитном порядке, во втором столбце указано, в какой стране выдвинутый работает (*Ge* — Германия, *US* — Соединенные Штаты Америки, *Fr* — Франция, *Ru* — Россия, *In* — Индия, *Au* — Австрия). В третьем столбце — *Code* буквой *d* отмечено, что выдвигавший считал, что премия должна быть разделена (*divided*) с кем-то еще. Буква *u* означает, что премия должна быть целиком отдана выдвинутому лицу (*undivided*). В четвертом столбце имя выдвигавшего (*Nominator*).

В конце этой части списка помещено имя отвергнутого кандидата (первый столбец). Во втором столбце страна, где кандидат работает, в третьем столбце символ, объясненный в табл. 7, в последнем четвертом столбце имя выдвинувшего.

Во второй части этого списка заголовок гласит: список выдвигавших по физике. Получивший премию Раман Ч.В.

В первом столбце указаны имена выдвигавших в алфавитном порядке.

Во втором столбце указано, к какой из шести категорий (см. табл. 6) относится выдвигавший (*Nominator*) на премию.

В таблице 6³ перечислено, кто имеет право выдвижения кандидатов на соискание Нобелевской премии. Цифра 13 (в списке выдвигавших) означает, что выдвигавший соответствует пунктам 1 и 3 табл. 6.

³ Таблица 6.

Имеющие право выдвигать на Нобелевскую премию.

1. Члены академии наук (подразумеваются шведские и иностранные члены Королевской Академии наук (И.Ф.)).
2. Члены Академического нобелевского комитета.
3. Получившие Нобелевскую премию раньше.
4. Профессора физики и химии скандинавских университетов и высших школ в Швеции и других скандинавских странах, существовавших в 1900 году.
5. Заведующие кафедрами физики и химии шести или более иностранных университетов, отобранных академией наук для более широкого представительства в разных географических регионах.
6. Отдельные ученые, приглашенные сделать свое выдвижение.

1930: CENSUS OF PHYSICS NOMINEES

Winner: Raman, CV

Nominee	Nat'y	Code	Nominator
Born, M	Ge	d	Pringsheim, P
Bowen, IS	Us	d	Millikan, RA
Bowen, IS	Us	d	Oshorn, HF
Cotton, A	Fr	u	Guillaume, CE
Cotton, A	Fr	u	Villat, H
Davissom, CJ	Us	d	Millikan, RA
Davissom, CJ	Us	d	Oshorn, HF
Davissom, CJ	Us	u	Richardson, OW
Debye, P	Ge	u	Walther, A
Debye, P	Ge	u	Warburg, E
Ferrié, GA	Fr	u	Townsend, JSE
Gerlach, W	Ge	d	Campbell, WW
Heisenberg, W	Ge	d	Frenkel, Y
Heisenberg, W	Ge	d	Nagaoka, H
Heisenberg, W	Ge	d	Perrin, J
Heisenberg, W	Ge	d	Planck, M
Heisenberg, W	Ge	d	Pringsheim, P
Heisenberg, W	Ge	u	Soedberg, T
Hilbert, D	Ge	u	Hadamard, J
Landsberg, GS	Ru	d	Khvostov, O
Langevin, P	Fr	d	Nicollé, C
Mandel'shtam, L	Ru	u	Papaleksi, N
Mandel'shtam, L	Ru	d	Khvostov, O
Paschen, F	Ge	d	Franch, J
Raman, CV	In	d	Bloch, E
Raman, CV	In	d	Bohr, N
Raman, CV	In	u	Broglie, L de
Raman, CV	In	u	Broglie, M de
Raman, CV	In	d	Khvostov, O
Raman, CV	In	d	Perrin, J
Raman, CV	In	u	Pfeiffer, R
Raman, CV	In	u	Rutherford, E
Raman, CV	In	u	Stark, J
Raman, CV	In	u	Wilson, CTR
Russell, HN	Us	d	Oshorn, HF
Saha, M	In	u	Bose, DM
Saha, M	In	u	Mitra, SK
Schrödinger, E	Au	d	Campbell, WW
Schrödinger, E	Au	u	Cantone, M
Schrödinger, E	Au	d	Frenkel, Y
Schrödinger, E	Au	u	Krutkov, Y
Schrödinger, E	Au	u	Laue, M von
Schrödinger, E	Au	u	Miroslubov, N
Schrödinger, E	Au	d	Nagaoka, H
Schrödinger, E	Au	d	Planck, M
Schrödinger, E	Au	d	Plate, I
Schrödinger, E	Au	d	Franch, J
Sommerfeld, A	Ge	d	Millikan, RA
Sommerfeld, A	Ge	d	Oshorn, HF
Sommerfeld, A	Ge	d	Plate, L
Stern, O	Ge	d	Campbell, WW
Stern, O	Ge	d	Franch, J
Weiss, P	Fr	u	Cabrera, B
Weiss, P	Fr	u	Gley, E
Weiss, P	Fr	d	Nicollé, C
Wood, RW	Us	d	Bloch, E
Wood, RW	Us	d	Bohr, N
Wood, RW	Us	d	Franch, J
Wood, RW	Us	u	Rozhdestvenskiy, D

Disallowed Nominations

Broglie, M de Fr §7B Gley, E

1930: CENSUS OF PHYSICS NOMINATORS

Winner: Raman, CV

Nominator	Auth	Status	Nominee
Bloch, E	5	1d	Raman, CV
Bloch, E	5	1d	Wood, RW
Bohr, N	13	1de	Raman, CV
Bohr, N	13	1ue/1de	Wood, RW
Bose, DM	5	u	Saha, M
Broglie, L de	3	u	Raman, CV
Broglie, M de	6	u	Raman, CV
Cabrera, B	6	u	Weiss, P
Campbell, WW	1	1d	Gerlach, W
Campbell, WW	1	1d	Stern, O
Campbell, WW	1	2u	Schrödinger, E
Cantone, M	5	u	Schrödinger, E
Franch, J	3	1u	Stern, O
Franch, J	3	2d	Paschen, F
Franch, J	3	2d	Sommerfeld, A
Franch, J	3	3u	Wood, RW
Frenkel, Y	5	1d	Heisenberg, W
Frenkel, Y	5	1d	Schrödinger, E
Gley, E	1	1ue	Weiss, P
Guillaume, CE	13	u	Cotton, A
Hadamard, J	1	u	Hilbert, D
Khvostov, O	6	1d	Raman, CV
Khvostov, O	6	1d	Landsberg, GS
Khvostov, O	6	1d	Mandel'shtam, L
Krutkov, Y	6	1u	Schrödinger, E
Laue, M von	3	u	Schrödinger, E
Millikan, RA	3	1u	Sommerfeld, A
Millikan, RA	3	2u	Davissom, CJ
Millikan, RA	3	3u	Bowen, IS
Miroslubov, N	5	u	Schrödinger, E
Mitra, SK	5	u	Saha, M
Nagaoka, H	6	1d	Heisenberg, W
Nagaoka, H	6	1d	Schrödinger, E
Nicollé, C	1	1d	Langevin, P
Nicollé, C	1	1d	Weiss, P
Oshorn, HF	1	1u	Sommerfeld, A
Oshorn, HF	1	2u	Davissom, CJ
Oshorn, HF	1	3u	Bowen, IS
Oshorn, HF	1	4u	Russell, HN
Oshorn, HF	5	u	Mandel'shtam, L
Papaleksi, N	5	u	Heisenberg, W
Perrin, J	13	1de	Raman, CV
Perrin, J	13	1ue/1de	Raman, CV
Pfeiffer, R	1	u	Raman, CV
Planck, M	13	1d	Heisenberg, W
Planck, M	13	1d	Schrödinger, E
Plate, I	1	1d	Schrödinger, E
Plate, I	1	1d	Sommerfeld, A
Pringsheim, P	5	1d	Born, M
Pringsheim, P	5	1d	Heisenberg, W
Pringsheim, P	5	1d	Davissom, CJ
Richardson, OW	5	u	Wood, RW
Rozhdestvenskiy, D	5	u	Raman, CV
Rutherford, E	13	u	Raman, CV
Stark, J	3	u	Raman, CV
Soedberg, T	2	u	Heisenberg, W
Townsend, JSE	5	u	Ferrié, GA
Villat, H	5	u	Cotton, A
Walther, A	5	u	Debye, P
Warburg, E	5	u	Debye, P
Wilson, CTR	3	u	Raman, CV

Disallowed Nominations

Gley, E §7B 1ue Broglie, M de

Table 2

Members of the Nobel prize committees

Member	Dates of service	Position
Committee on physics		
Ångström, K	1900–1910	Uppsala University
Arrhenius, A	1900–1927	Stockholm Högskola
Carlheim-Gyllensköld, V	1910–1934	Stockholm Högskola
Granqvist, G	1904–1922	Uppsala University
Gullstrand, A	1911–1929	Uppsala University
Hasselberg, B	1900–1922	Academy of Sciences
Hildebrandsson, H	1900–1910	Uppsala University
Hulthén, E	1929–1962	Stockholm Högskola
Lindh, AE	1935–1960	Uppsala University
Oseen, CW	1923–1944	Uppsala University
Pleijel, H	1928–1947	Royal Inst. of Tech.
Stegbahn, M	1923–1962	Uppsala University
Thalen, R	1900–1903	Uppsala University

Committee on chemistry

Member	Dates of service	Position
Committee on chemistry		
Cleve, PT	1900–1905	Uppsala University
Ekstrand, ÅG	1913–1924	Government service
Euler-Chelpin, H von	1929–1946	Stockholm Högskola
Hammarssten, O	1905–1926	Uppsala University
Holmberg, GS	1934–1953	Royal Inst. of Tech.
Klason, P	1900–1925	Royal Inst. of Tech.
Palmaer, W	1926–1942	Royal Inst. of Tech.
Pettersson, O	1900–1912	Stockholm Högskola
Ramberg, L	1927–1940	Uppsala University
Söderbaum, H	1900–1933	Academy of Agriculture
Svedberg, T	1925–1964	Uppsala University
Widman, O	1900–1928	Uppsala University

Table 6

Nominators' authority code

1. Members of the Academy of Sciences
2. Members of the Academy's Nobel committees
3. Previous winners in physics and chemistry
4. Physics and chemistry professors at the Nordic universities listed in the special regulations of 1900
5. Chairholders at invited universities
6. Specially invited individuals

Table 7

Code of excluded nominations

§4	Division proposed contrary to statutes
§7A	Self-nomination
§7B	Received after deadline of February 1
§8A	No specific work mentioned or work not published
§8B	Candidate not mentioned
NP	Candidate received prize during the previous two years
†	Candidate died before February 1 of year of nomination
UA	Proposal from unauthorized nominator
WD	Proposal withdrawn
-P	Outside domain of the physics committee
-C	Outside domain of the chemistry committee

В третьем столбце (Status) цифрой обозначен порядок выбора — 1, 2, 3. Если, к примеру, Бор ставит Раману 1de, а Вуду — 1ue/1de, то это означает, что он рекомендует либо присудить премию одному Вуду, либо разделить премию между Вудом и Раманом.

В последнем, четвертом, столбце указано имя выдвинутого.

В конце списка помещено имя отвергнутого кандидата (первый столбец), во втором столбце — символ, объясненный в табл. 7⁴, мотивирующий причину исключения лица из списка кандидатов на премию, и в последнем, четвертом, столбце — имя выдвинувшего.

Первый же взгляд на список выдвинутых на Нобелевскую премию 1930 года производит сильное впечатление. По существу, выдвинутые и выдвигавшие представляют цвет физики и не только 1930 года.

Среди выдвинутых за открытие одного и того же явления — Раман из Индии и Ландсберг и Мандельштам из Советского Союза.

Бросается в глаза количество физиков и научный авторитет, выдвинувших Рамана. Ч.В. Рамана выдвинуло десять физиков, среди которых Н. Бор, Л. де Бройль, Ж. Перен, Э. Резерфорд, Ж. Штарк и наш соотечественник О.Д. Хвольсон. Л.И. Мандельштам выдвинули двое — О.Д. Хвольсон и Н.Д. Папалекси, а Г.С. Ландсберга выдвинул один О.Д. Хвольсон.

Заслуживает самой высокой оценки объективность и линия поведения автора пятитомного курса физики (1923 год) профессора О.Д. Хвольсона. Другие три наши соотечественника (кроме Хвольсона и Папалекси) в 1930 году сделали свои выдвижения достойных премии кандидатов, но не выдвинули за выдающееся открытие Ландсберга и Мандельштама, а число выдвигаемых не ограничено. Например, в 1929 году Н. Бор выдвинул сразу четыре кандидатуры на премию.

Достойно сожаления, что заслуживающие Нобелевской премии Ландсберг и Мандельштам были выдвиг-

⁴ Таблица 7.

Исключенные из списка выдвинутых.

§ 4. Голосование кандидатур не по правилам.

§ 7A. Самовыдвижение.

§ 7B. Выдвижение, сделанное после последнего срока 1 февраля.

§ 8B. Кандидат не назван.

NP. Кандидат получил премию в течение последних двух лет.

+ Кандидат умер до 1 февраля года выдвижения.

UA. Выдвижение лицом, не имеющим на это право.

WD. Выдвижение, взятое назад.

P. Вне компетенции комитета по физике.

C. Вне компетенции комитета по химии.

нуты только одним и двумя соотечественниками, соответственно. Никак нельзя сказать, что их открытие было неизвестно. Оно в августе 1928 года докладывалось на 6-м съезде ассоциации русских физиков. На съезде присутствовало 400 человек!

Остается вопрос, почему русским физикам не присудили Нобелевскую премию? Ведь точно за такую же и тогда же сделанную работу индийскому физики премию дали? Возможно, точного ответа на этот вопрос получить не удастся.

Однако прав В.Л. Гинзбург [30], который обращает внимание на совокупность причин, которые, возможно, сыграли основную роль. Прежде всего, конечно, безразличие отечественных физиков, имевших право на выдвижение кандидатов на премию. Далее странно, что зарубежные физики, хорошо знавшие о работе Ландсберга и Мандельштама и имевшие право на выдвижение, этого не сделали. Резерфорд, например, в 1929 году высоко оценил открытие Ландсберга и Мандельштама (см. выше), но почему-то выдвинул одного Рамана. Русский академик, проф. О.Д. Хвольсон выдвинул и Ландсберга, и Мандельштама, и Рамана, проявив прекрасное понимание сути дела и достойное крупной личности беспристрастие.

Наконец, список выдвинутых и выдвигавших лежит перед членами Нобелевского комитета, и они видят, что Рамана выдвинуло 10 крупных физиков, а Ландсберга выдвинул один соотечественник — известный профессор, хороший ученый, но его нельзя сравнить, например, с Бором, Резерфордом, де Бройлем.

И хотя Нобелевский комитет состоит из выдающихся независимых людей, но все же людей.

Может быть, если бы члены Нобелевского комитета отчетливо понимали, что открытие Рамана и Ландсберга и Мандельштама, — это открытие одного и того же явления, то они понимали бы, что выдвинувшие Рамана тем самым выдвинули и Ландсберга, и Мандельштама.

Если бы такое понимание, какое есть теперь, было тогда, то можно думать, что Нобелевский комитет не сделал бы этой досадной ошибки⁵.

У Ландсберга и Мандельштама много выдающихся научных достижений. Оба удостоены высших национальных премий. Особенно велики научные заслуги Л.И. Мандельштама, создавшего крупную научную школу физиков в России.

Станным образом комбинационное рассеяние света как открытие советских ученых не было отмечено ни интернациональной, ни национальной, ни академической и даже ни институтской премией, и это представляется чудовищным!

⁵ Недавно на вопрос А.М. Блоха секретарю Нобелевского комитета по физике А. Барани: "Почему Ландсбергу и Мандельштаму не была присуждена Нобелевская премия 1930 года вместе с Раманом?" А. Барани ответил: "Если же вернуться к истории премий по физике 1930 года, первейшее внимание следует сосредоточить на том, как открытие спектров комбинационного рассеяния было преподано. В то время, как Раман быстро и эффективно озабочился публикацией своих экспериментальных результатов, советские физики не торопились, а в своем первом сообщении даже сослались на работы Рамана. Кто же в таких обстоятельствах будет реагировать на истинного первооткрывателя?" (Газета "Поиск" № 24, 6–12 июня 1998 г.) Хорошо, что хотя бы теперь истинный первооткрыватель известен.

6. Начало систематического исследования нового явления

Пожалуй, еще до того, как новое явление — комбинационное рассеяние света начало систематически изучаться, в коротких заметках Борна и Дарвина, а также в речи Резерфорда предсказывалось серьезное будущее новому явлению в разных областях науки и особенно в изучении твердого тела. Отчасти об этом кратко было сказано выше и подробнее в упомянутых обзорах [1, 2]. Повторяясь, обратим внимание на то, что новое явление привлекло внимание физиков в разных странах мира.

Укажем только, что в нашей стране эта работа выполнялась главным образом Г.С. Ландсбергом и Л.И. Мандельштамом и их сотрудниками и учениками, в частности, М.А. Леонтовичем и С.Л. Мандельштамом (мл.), в Индии — Ч.В. Раманом, во Франции — Кабаном, в Соединенных Штатах Америки — Р. Вудом. Были также в этом русле исследования, выполненные в Англии и Италии.

Масштаб исследований в двадцатых годах истекающего столетия был ничтожно мал по сравнению с масштабом научных работ, развивающихся теперь, когда пишутся эти строки.

И все же интерес к новому явлению был так велик, что еще в 1928 году — году открытия явления, ему было посвящено 70 публикаций, а к концу следующего года их было уже 200.

На этом исследования не задерживались, а напротив, темп работы продолжал нарастать, и к 1939 году число работ достигло 1800, в которых были изучены спектры комбинационного рассеяния 2500 соединений.

С самого начала количество работ было так велико, а содержание так разнообразно, что уже в 1931 году была написана К. Кольраушем книга, содержащая обзор этих работ, а в 1938 году им же написан дополнительный том под названием "Der Smekal-Raman-Effekt" [32].

В 1934 году выходит обзор Плачека [25]. В русском переводе книга называется "Рэлеевское рассеяние и раман-эффект" и посвящена теории обоих видов рассеяния света.

К. Кольрауш [33] в 1943 году издает объемистую книгу "Ramanspectren", а в 1952 году она появляется в русском переводе под названием "Спектры комбинационного рассеяния" объемом 44 авторских листа. Книга снабжена пространной, глубокой по содержанию вступительной статьей Г.С. Ландсберга.

В 1949 году появилась двухтомная монография "Колебания молекул", написанная М.В. Волькенштейном, М.А. Ельяшевичем и Б.И. Степановым [34]. Десятью годами раньше, а именно в 1939 году, в США выходит книга Г. Герцберга [35] "Спектры и строение двухатомных молекул", переведенная на русский язык в 1949 году (36 авторских листов). Монография "Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул" того же автора выходит в Америке в 1945 году и переводится на русский язык в 1949 году. Наконец, Г. Герцберг издает в 1966 году книгу "Электронные спектры и строение многоатомных молекул" (объем 75,62 авторских листа), которая переводится на русский язык и выходит в свет в 1969 году. В этом же году выходит книга М.М. Сушинского [36] "Спектры комбинационного рассеяния молекул и кристаллов". Укажем еще на серию книг "Рассеяние света в твердых телах" под

редакцией М. Кардоны [37] выпуск I, вышедший в США в 1975 году, а в переводе на русский язык у нас — в 1979 году; под редакцией М. Кардоны и Г. Гюнтерода [37] выпуск II, вышедший в США в 1982 году и переведенный у нас в 1984; выпуск III, вышедший в США в 1982 году и переведенный и опубликованный у нас в 1985 году и, наконец, изданный в США в 1984 году выпуск IV, переведенный на русский язык и изданный у нас в 1986 году.

Переведена на русский язык и "Спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах и жидкостях" под редакцией А. Вебера [38], вышедшая в 1982 году.

Существует также большое число статей, обзоров и книг, посвященных комбинационному рассеянию света, перечисление которых превратило бы эту статью в объемистую книгу, чего делать нельзя и не нужно. Отмеченные выше книги ни в какой степени не могут претендовать на достаточно полный обзор. В частности, среди названных книг нет объемистых трудов конференций, посвященных разным аспектам комбинационного рассеяния света и его приложения для изучения различных явлений, строения молекул и для аналитических и чисто прикладных задач.

Комбинационное рассеяние света, несомненно, представляет собой чрезвычайно тонкий и эффективный инструмент изучения взаимодействия излучения с веществом в широком смысле этого понятия.

Разумеется, настоящая статья ни в малейшей степени не претендует на полноту перечисления всех исследований и приложений КРС, но на некоторые существенные области указать следует.

Появление в лабораторной практике лазерных источников света — газовых лазеров, таких как Ne–He или Ag^+ с узкой линией излучения и направленным излучением света, дали возможность изучать такие тонкости спектральных особенностей, которые были недоступны исследованиям, использовавшим ртутную дугу в качестве источников света. Возникла целая область — спектроскопия высокого разрешения и даже спектроскопия сверхвысокого разрешения [39]. У некоторых исследователей создается впечатление, что до появления лазеров спектроскопии не было вообще. Однако это не так. До появления в 1960 году лазеров сделано было удивительно много. В течение 20 лет, прошедших между открытием КРС и созданием газовых лазеров, спектроскописты зря времени не теряли. Чтобы убедиться в этом, достаточно ознакомиться с названными выше книгами.

Одновременно с газовыми лазерами также в 1960 году появились мощные твердотельные лазеры, применение которых привело к открытию новых явлений — вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР) и гиперкомбинационного рассеяния света. Появлению лазеров обязано также создание нового метода, называемого когерентным антистоксовым рассеянием света (КАРС).

Об этих новых нелинейных явлениях, в основе которых лежит КРС, будет кратко сказано ниже.

7. Спектры комбинационного рассеяния света

Если молекула состоит из N атомов, то такая молекула имеет $3N$ степеней свободы, и, следовательно, можно было бы ожидать, что в молекуле будет осуществляться

$3N$ колебаний. Однако три поступательных и три вращательных степени свободы следует исключить, тогда остается лишь $3N - 6$ степеней свободы. Например, для молекулы воды, когда $N = 3$, и остается три степени свободы. Однако дело не так просто, как может показаться.

Общий классический взгляд на природу КРС остается тот же, который описали Ландсберг и Мандельштам и который в простейшем случае приводит к формулам вида (3). Колебания атомов в молекуле деформируют электронную оболочку, что приводит к модуляции рассеянного света и к появлению смещенной стоксовой и антистоксовой линий в спектре. Число этих линий не будет равно числу степеней свободы уже потому, что различные атомы, колеблющиеся в молекуле, могут одинаково деформировать электронную оболочку и тогда в рассеянном свете будет одна линия, но вырожденная, и это вырождение может быть многократным.

Если молекула обладает некоторой анизотропией, то ее вращение также будет модулировать рассеянный свет.

Трансляционные колебания молекулы проявятся в виде колебательного спектра, а вращение молекулы отразится в спектре в виде вращательного спектра. На рисунке 1 приведена схема установки, использованная Ландсбергом и Мандельштамом [7, 40] при первых опытах с рассеянием света в кварце и исландском шпате.

В качестве примера на рис. 2 приведен колебательный спектр КРС в кварце. Рассеянный свет наблюдался под

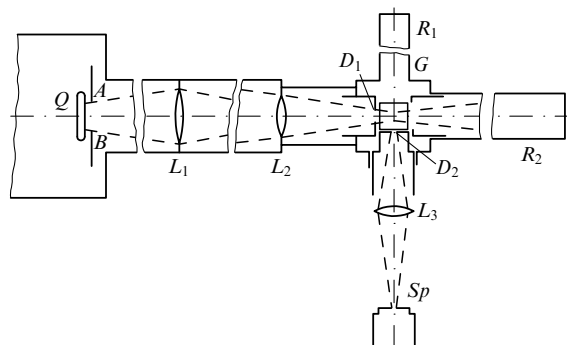


Рис. 1. Установка для исследования света, рассеянного в кристаллах кварца и исландского шпата, созданная Ландсбергом и Мандельштамом в их первых работах: Q — источник света, две линзы L_1 ($f = 450$ мм) и L_2 ($f = 250$ мм), AB — прямоугольное отверстие размером 20×4 мм², D_1 и D_2 — диафрагмы. Кристалл помещен в непрозрачную камеру G . R_1 и R_2 — насадки, создающие темный фон. L_3 — линза, фокусирующая рассеянный свет на щель спектрографа Sp [8, 40].

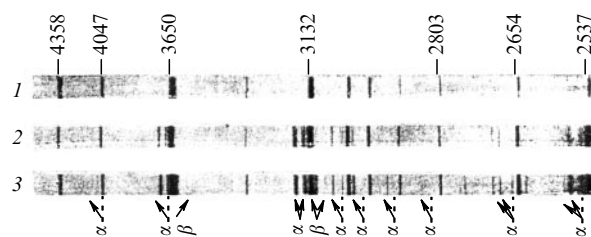


Рис. 2. Спектр света, рассеянного в кварце (двукратное увеличение): 1 — спектр сравнения; 2 и 3 — спектры рассеянного света, снятые при 20 и 210 °C (экспозиция 105 ч); α — красные сателлиты, β — фиолетовые сателлиты [8, 40].

углом 90° , а в качестве источника света служила 110-вольтовая ртутная лампа (Негеус).

Схема установки для наблюдения рассеянного света под углом 90° остается практически такой же и теперь. Изменился источник света — ртутная дуга заменена лазером и совсем другая система регистрации спектра.

Для сравнения схемы установки 70-летней давности (см. рис. 1) на рис. 3 показана схема современной установки, на рис. 4 — колебательно-вращательная полоса КРС в CO_2 .

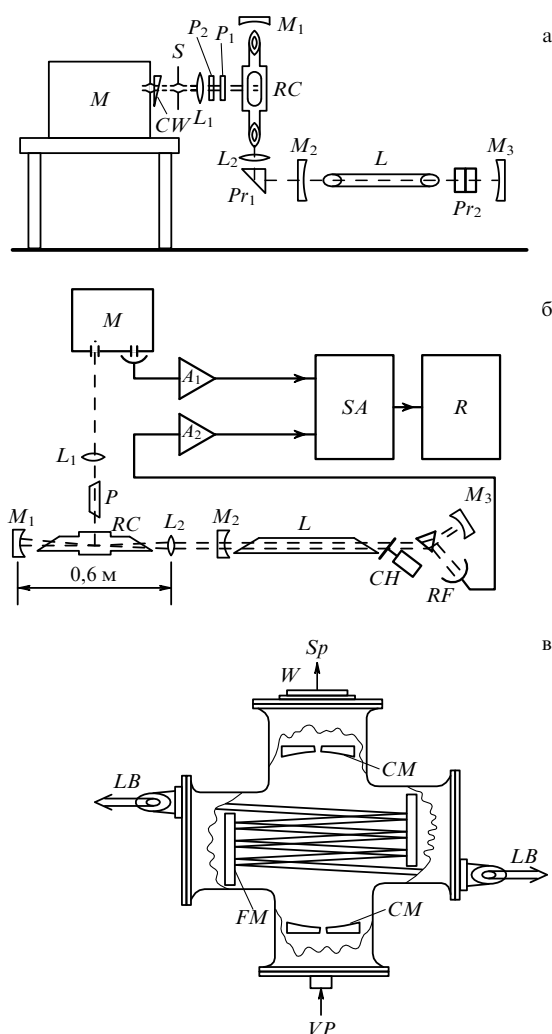


Рис. 3. Фотоэлектрическая установка с лазером для регистрации спектров комбинационного рассеяния света в газах [41] при вертикальном (а) и горизонтальном (б) расположении кюветы (RC): L — аргоновый лазер, M — монохроматор, L_1 и L_2 — линзы, P_1 и P_2 — поляризаторы. В каждой из установок кювета для комбинационного рассеяния может располагаться внутри или вне резонатора лазера (внутренний резонатор образуется зеркалами M_1 и M_3 , а внешний — M_2 и M_3). При работе вне лазерного резонатора зеркало M_1 может быть установлено таким образом, что пучок будет многократно проходить через кювету. Клиновидный кальцит (CW) деполаризует излучение перед входом в монохроматор. Поляризация лазерного пучка перпендикулярна плоскости рисунка (а) или параллельна ей (б). S — диафрагма; Pr_1, Pr_2 — поворотная призма; A_1, A_2, SA, R — регистрирующая система; CH — прерыватель; RF — фотоэлемент; P — призма; (в) многоходовая кювета для исследования комбинационного рассеяния света. Лазерный пучок (LB) входит и выходит через брестеровские окна. CM — вогнутые сферические зеркала, собирающие свет; FM — плоские зеркала; W — прозрачное окно; VP — вакуумный насос; Sp — спектрограф.

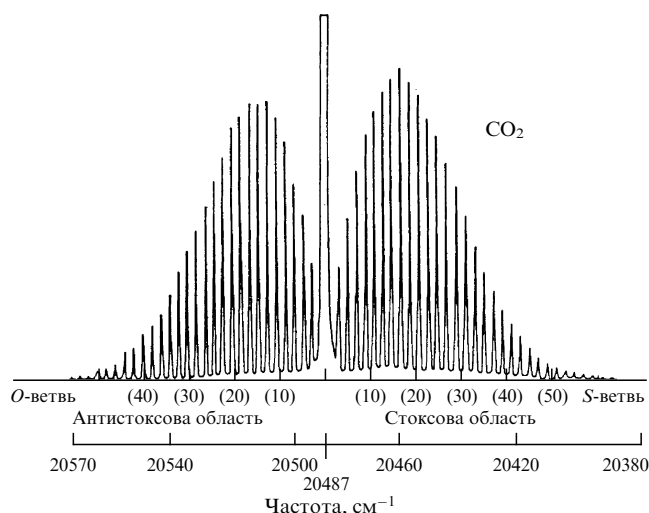


Рис. 4. Спектры рэлеевского рассеяния (линия в центре) и чисто вращательного комбинационного рассеяния молекулы CO_2 . Возбуждение производилось линией $\lambda 4881 \text{ \AA}$ излучения аргонового (Ar^+) лазера [90].

Спектры комбинационного рассеяния света оказались эффективными для изучения строения молекул. Спектр КРС для спектроскописта является примерно тем же, чем фотография здания для архитектора. Известно [2], что молекула может обладать центром, осью или плоскостью симметрии. Колебания различных элементов могут либо нарушать, либо не нарушать ее симметрию. Если колебания оставляют систему по всем ее элементам симметрии такой же, какой она была первоначально, то такое колебание есть полносимметричное. Линии спектра, обусловленные таким колебанием, наиболее интенсивны.

Можно сделать общее утверждение, что линии КРС появляются в спектре только в том случае, если поляризуемость молекулы α зависит от обобщенной координаты q , или что выполняется условие $\delta\alpha/\delta q \neq 0$ — такие колебания называют активными в КРС. В том случае, когда колебание меняет электрический момент молекулы, но выполняется условие $\delta\alpha/\delta q = 0$, в спектре КРС линии, соответствующей этому колебанию, не возникает, но возникает линия или полоса инфракрасного поглощения.

Правила отбора для комбинационного рассеяния и инфракрасного поглощения хорошо разработаны теоретически и их можно найти в уже цитированной литературе. В ряде случаев имеет смысл говорить о характеристических частотах для таких связей, как, например, C-H , C-C , N-H , Si-H и других. Линии комбинационного рассеяния в спектре характеризуются положением или частотой, интенсивностью, шириной и поляризацией. Исследование всех этих характеристик дает обширные сведения о строении молекул, квазиупругих связях атомов внутри молекул, включая определение величин коэффициента упругости.

Определение ширины линий дало много сведений о молекуле как о квантовой системе и позволило исследовать колебательно-вращательные спектры анизотропных молекул.

Первые тщательные интерферометрические определения ширины линии КРС принадлежат Х.Е. Стерину [42], а теоретическое описание ширины линии КРС —

И.И. Собельману [43]. Линии КРС молекулы при переходе от одного агрегатного состояния к другому, как правило, меняются мало, потому что внутримолекулярные силы гораздо больше межмолекулярных сил. Это существенное обстоятельство дает возможность экспериментатору добывать сведения о колебаниях молекул более легким путем, чем получение спектров в газообразной фазе.

Нужно, однако, отметить, что есть исключения, которые относятся к случаям так называемой водородной связи [44], области фазовых превращений [45] и резонансного комбинационного рассеяния света [38, 46, 47].

8. Резонансные явления

Под резонансными явлениями понимаются картины событий, возникающие, когда частоты двух или нескольких процессов совпадают между собой или близки друг другу, или находятся в определенном соотношении.

Резонансное взаимодействие излучения с веществом дает обильные сведения и о веществе, и об излучении, и, в частности, такие взаимодействия ярко проявляются в спектре комбинационного рассеяния света, но не только в нем.

Следует отметить, что влияние резонансного взаимодействия рассеянного света с веществом экспериментально изучалось впервые Ландсбергом и Мандельштамом в парах ртути [48–51] и тогда называлось ими "селективное рассеяние в парах ртути".

Для интенсивности рассеянного света в парах и газах Рэлей получил хорошо известную формулу, в которой зависимость от длины волны (частоты) определяется законом Рэля ($I \sim \lambda^{-4}$) и величиной $(n^2 - 1)^2$ и, следовательно, $I \sim \lambda^{-4}(n^2 - 1)^2$. Вдали от области собственной частоты вещества интенсивность рассеянного света определяется зависимостью от длины волны главным образом через закон Рэля. Величина $(n^2 - 1)^2$ от длины волны меняется чрезвычайно слабо.

Ландсберг и Мандельштам обратили внимание на то, что вблизи линии (или полосы) поглощения вещества дело радикально меняется. В этом последнем случае зависимость от длины волны будет главным образом определяться фактором $(n^2 - 1)^2$.

Экспериментальное исследование Ландсберга и Мандельштама [48] принадлежит к числу тонких и весьма трудных опытов.

Собственная частота (длина волны) паров ртути $\lambda 2537 \text{ \AA}$. В описываемых опытах пары освещались светом конденсированной искры между вращающимися цинковыми электродами. Изучалась интенсивность линий спектра цинка $2502 \text{ \AA}$ и $2558 \text{ \AA}$. Закон Рэля дает различие в интенсивности этих линий всего на 9 %, между тем как опыт дает различие в 20 раз. Такое различие согласуется с теоретическими расчетами.

Опыты эти в те времена были чрезвычайно сложны и трудны. Подробно о них можно узнать из [48–51]. Тот же механизм резонансного рассеяния лежит в основе других видов рассеяния.

Резонансное комбинационное рассеяние света наблюдалось впервые Шорыгиным [52], который обнаружил, что линии КРС в некоторых растворах органических соединений вблизи полосы поглощения были по интенсивности "в сотни тысяч раз (!) больше, чем

при обычных условиях возбуждения вдали от резонанса".

Это очень эффектное оптическое явление информативно и детально изучено с экспериментальной и теоретической стороны [48–52, 37, 38, 46].

Когда частота линии комбинационного рассеяния в кристалле, соответствующая модуляции рассеянного света оптической ветвью, совпадает с частотой возбуждения среды, тогда дисперсионная кривая — зависимость частоты от волнового числа приобретает вид, показанный на рис. 5. В области такого резонанса образуются смешанные колебания среды и электромагнитного излучения или поляритоны. Кривая 1 соответствует фотонной ветви, а 2 — поляритонной ветви. Штрихпунктирная прямая соответствует первоначальной оптической частоте ω_0 . Штриховая прямая описывает дисперсию фотонов [53–56].

В спектрах комбинационного рассеяния молекул или кристаллов осуществляется характерное явление, называемое резонансом Ферми. Такой резонанс возникает, когда, например, в спектре комбинационного рассеяния молекулы CO_2 частота валентных или полносимметричных колебаний ν_1 почти совпадает с первым обертоном деформационных колебаний $2\nu_2$ [47, 57–59].

Ферми-резонанс проявляется также и в спектрах поляритонов [47, 53, 54, 60] (рис. 6). Явление ферми-резонанса может быть описано как результат взаимодействия двух линейных осцилляторов, связанных между собой нелинейной связью. Весь круг вопросов, связанных с этой проблемой, был поставлен и детально изучен Мандельштамом [49] и его учениками [61].

Подобного рода резонансное явление можно продемонстрировать на простейшей механической модели: спиральная пружина длиной l , характеризующаяся коэффициентом упругости k , закреплена одним концом к массивной балке или консоли, а к другому ее концу прикреплен груз массой m . Такой маятник может совер-

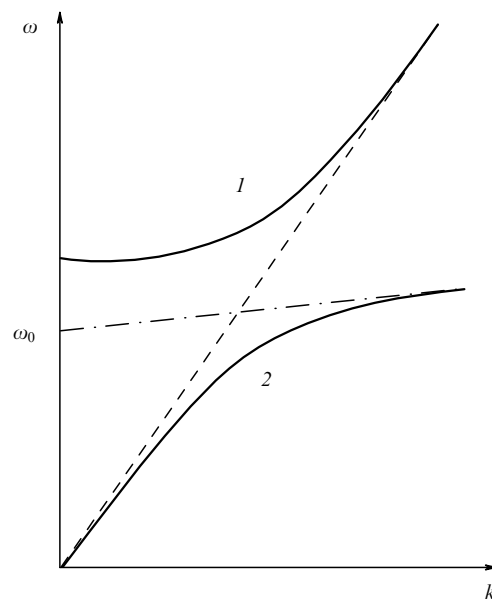


Рис. 5. Картина образования фотонной 1 и поляритонной 2 ветвей (сплошные кривые). Штрихпунктирная линия показывает первоначальное колебание частоты ω_0 оптической ветви кристалла, штриховая линия — фотонная ветвь, ω — частота, k — волновое число.

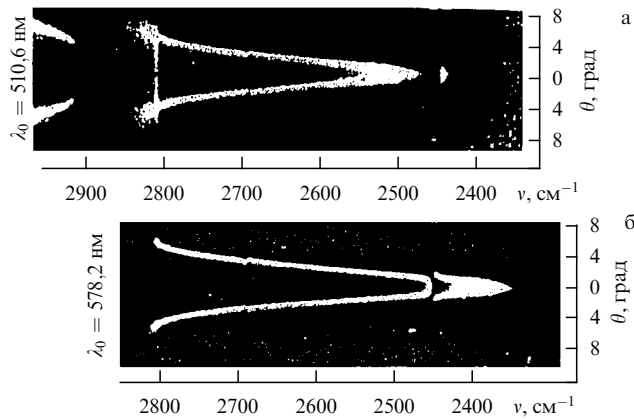


Рис. 6. Эффект поляритонного резонанса Ферми в спектре комбинационного рассеяния на поляритонах, наблюдаемом при малых углах рассеяния θ в кристаллах хлористого аммония: (а) и (б) соответствуют двум возбуждающим линиям лазера на парах меди: 510,6 и 578,2 нм, соответственно [60].

шать вертикальные колебания с частотой $\omega_1 = \sqrt{k/m}$ и угловые колебания с частотой $\omega_2 = \sqrt{g/l}$, где g — ускорение свободного падения.

Можно наблюдать, что, если $\omega_1 = 2\omega_2$, то энергия вертикальных колебаний системы эффективно передается угловым колебаниям и обратно.

9. Фазовые переходы

Спектры КРС оказались эффективным средством изучения фазовых переходов второго рода и родственных им. Теперь имеются многочисленные исследования поведения линий КРС в разнообразных средах, но главным образом в кристаллах.

Начало этому плодотворному направлению исследований было положено теоретическими работами Гинзбурга [45, 54, 62] и развито им и его учениками Леванюком и Собяниным [63]. К этим исследованиям присоединились и другие теоретики. Сколько-нибудь полно рассказать о развитии теории здесь нет возможности.

Из упомянутой феноменологической теории следует, что частота некоторой линии КРС при приближении к критической температуре кристалла будет постепенно смещаться к частоте несмещенной линии и, наконец, сольется с частотой возбуждающего света, а следовательно, спутник как смещенная линия исчезнет. Исчезновение линии КРС означает, что некоторые колебания в кристалле перестали существовать. Понижение частоты мягкой моды для примера приведено на рис. 7. На мягкой моде может также наблюдаться эффект опалесценции в области сегнетоэлектрического фазового перехода [62]. Пример такого явления приведен на рис. 8.

Нам особенно интересно подчеркнуть здесь, что впервые мягкая мода в спектре комбинационного рассеяния в монокристалле кварца наблюдалась в эксперименте Ландсберга и Мандельштама [65]. В этих опытах было выяснено, что линия КРС 207 см^{-1} при приближении температуры к $\alpha \leftrightarrow \beta$ переходу в кристалле кварца ведет себя "аномальным" образом. Линия КРС в кварце вдали от фазового перехода наблюдается как отчетливая спектральная линия, при повышении температуры линия

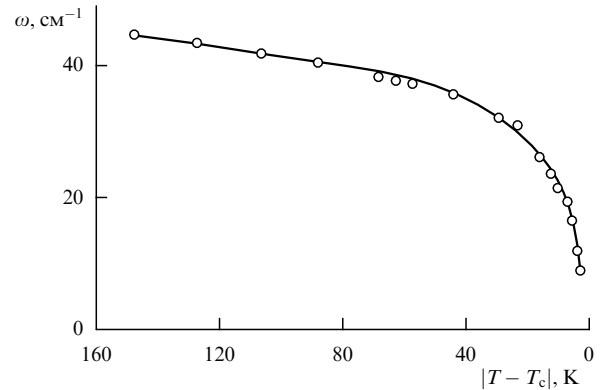


Рис. 7. Температурная зависимость частоты мягкой моды ω SbSI [64].

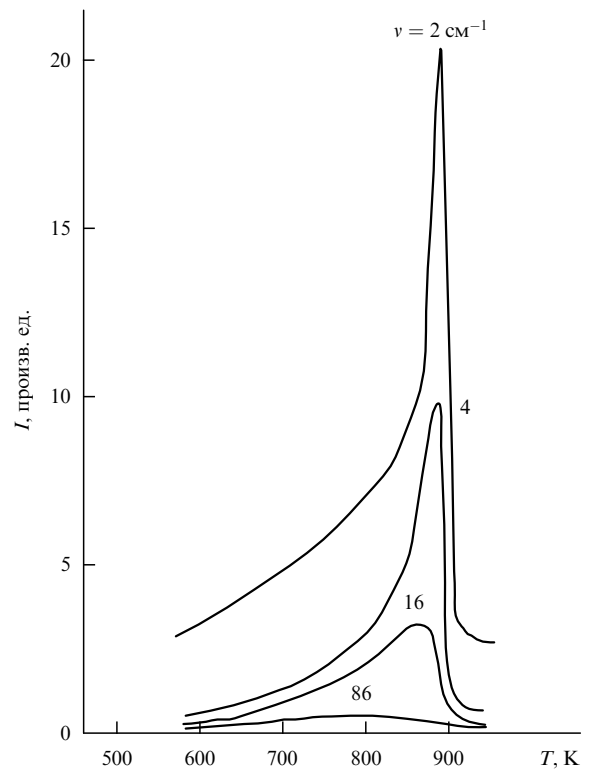


Рис. 8. Эффект опалесценции в спектре комбинационного рассеяния света (мягкая мода) вблизи точки сегнетоэлектрического фазового перехода (898 К) в кристалле танталата. Цифры у кривых обозначают частоты, для которых определяется температурная зависимость интенсивности комбинационного рассеяния света [60].

расширяется, а в β -кварце при температуре $T > T_c = 846 \text{ К}$ (T_c — критическая температура $\alpha \leftrightarrow \beta$ перехода) исчезает совсем. Авторы этого опыта отчетливо понимали, что они наблюдают весьма существенное явление. Они отметили, что такое поведение линии КРС указывает на значительное изменение или на исчезновение связей, обуславливающих соответствующее колебание. Это правильное понимание явления и глубокое проникновение в его суть, хотя фундаментальная феноменологическая теория появилась только через 20 лет [45, 62, 63].

Тот факт, что Ландсберг и Мандельштам действительно наблюдали эффект мягкой моды, был подтвержден позже [66, 67].

10. Вынужденное комбинационное рассеяние света (ВКР)

С появлением мощных твердотельных импульсных и квазинепрерывных лазеров возникла обширная область науки — нелинейная оптика [68–71] и различные ее ответвления, такие, например, как нелинейная волоконная оптика [72] и другие.

Через два года после того, как у Меймана заработал твердотельный лазер на кристалле рубина, а именно в 1962 году, Вудбери и Нг [73] построили лазер на рубине с модулированной добротностью. При этом добротность они модулировали ячейкой Керра, заполненной жидким нитробензолом. При изучении работы своего лазера они обнаружили, что помимо лазерного излучения, обычного для рубинового лазера, появилось излучение на 1345 см^{-1} меньше основного излучения. Появление такого излучения не ожидалось. Оказалось, что это излучение совпадает по частоте с самой сильной линией КРС нитробензола. Так было открыто вынужденное комбинационное рассеяние света. Интересно отметить, что тепловое КРС, описанное выше, и ВКР были открыты случайно, но и КРС было предсказано Смекалем [23] и Крамерсом и Гейзенбергом [24], а ВКР — Плачеком [25].

По-видимому, все объясняется просто — экспериментаторы не знали работ теоретиков. Впрочем, это слишком примитивное суждение, может быть, здесь дело обстоит сложнее — тогда это интересная проблема для историка науки.

В вынужденном рассеянии, как правило, возникает одна самая интенсивная стоксова компонента КРС, совпадающая по частоте с тепловым рассеянием. Однако возникают также и антистоксовы компоненты. Сейчас теория этого явления хорошо разработана [68–71, 74].

Отметим, что тепловое КРС является некогерентным излучением, составляющим 10^{-7} – 10^{-8} часть возбуждающего света, тогда как ВКР является когерентным излучением, по интенсивности составляющим величину порядка половины энергии возбуждающего света или даже больше.

Форма линии теплового КРС в спектре ВКР искажена и не пригодна для изучения строения молекул, но это новое типичное нелинейное оптическое явление открывает много других возможностей.

Укажем еще на одно новое оптическое явление. Вскоре после появления лазерных источников света Мейкер и Терхюн [75] предложили и осуществили мощный метод исследования в спектроскопии комбинационного рассеяния света. Этот метод основан на нелинейном взаимодействии трех пучков света с частотами ω_L , ω_s , ω_L , встречающихся в изучаемой среде.

Разность частот двух из трех названных пучков такова, что $\hbar(\omega_L - \omega_s) \sim \hbar\Omega$, где $\hbar\Omega$ — разность энергий между основным E_1 и первым возбужденным уровнем E_2 . Благодаря нелинейному взаимодействию этих пучков возникает излучение на частоте $\omega_{as} = 2\omega_L - \omega_s$, которое регистрируется в эксперименте. Интенсивность такого

излучения может превышать интенсивность теплового КРС на пять–десять порядков.

Кроме выполнения закона сохранения энергии должен также выполняться закон сохранения импульса:

$$2\hbar\mathbf{k}_L = \hbar\mathbf{k}_s + \hbar\mathbf{k}_{as},$$

$\mathbf{k}$ — волновые векторы.

Поскольку импульсы есть величины векторные, они и складываться должны как векторы.

Различие в направлениях распространения возбуждающих и рассеянных пучков света облегчает наблюдение, тем более, что $\mathbf{k}_L$ и $\mathbf{k}_{as}$ имеют строго определенное и различное направление распространения и не рассеиваются во все стороны. Поскольку в этом методе исследуется антистоксов сателлит КРС, этот метод будем называть КАРС — когерентное антистоксово рассеяние света.

Этот метод дает много возможностей изучать и КРС, и различные свойства и особенности материальной среды. Особенную силу приобрел метод КАРС, когда стали доступны перестраиваемые лазеры.

Обратим также внимание на то существенное обстоятельство, что в этом методе не нужна спектральная аппаратура. Разрешение определяется суммой ширин используемых лазерных пучков. В современных установках КАРС позволяет разрешить линии, отстоящие друг от друга на величину $\sim 0,001\text{ см}^{-1}$.

Метод КАРС-спектроскопии в разнообразных задачах играет настолько существенную роль, что он дает возможность решать такие задачи, которые без него вряд ли могли бы быть осуществлены. В качестве примера приведем решение двух вопросов методом КАРС-спектроскопии. Исследование нестационарной задачи обмена энергией между колебательными уровнями сложной молекулы (SF_6) и применение метода КАРС-спектроскопии к изучению распространения возбуждения (поляритон) в кристалле.

Метод КАРС, в частности, позволяет исследовать вид распределения молекул по колебательно-вращательным уровням и контролировать трансформацию этого распределения под действием столкновений. Высокое спектральное и временное разрешение КАРС-спектроскопии позволяет получать недоступную другим методам детальную информацию о функции распределения молекул по колебательным уровням, которая формируется в результате воздействия интенсивного лазерного импульса (например, инфракрасного диапазона), и определять модовый состав возбужденных колебательных состояний. Кроме того, возможность создавать в лазерном поле существенно неравновесное распределение молекул по колебательным уровням позволяет определять методом КАРС-спектроскопии скорости и основные каналы колебательной релаксации при столкновениях с высоковозбужденными молекулами. КАРС-спектры и рассчитанные по ним функции распределения молекул представлены на рис. 9 [76].

Путем бигармонического возбуждения экситона в кристалле BeO двумя пучками света с различными частотами и волновыми векторами ω_1 , $\mathbf{k}_1$ и ω_2 , $\mathbf{k}_2$ в области пересечения и нелинейного взаимодействия двух пучков (рис. 10) в некоторой области образуется поляритон. В опыте, осуществленном Поливановым [77] и Поливановым и Орловым [78], зондирующий луч

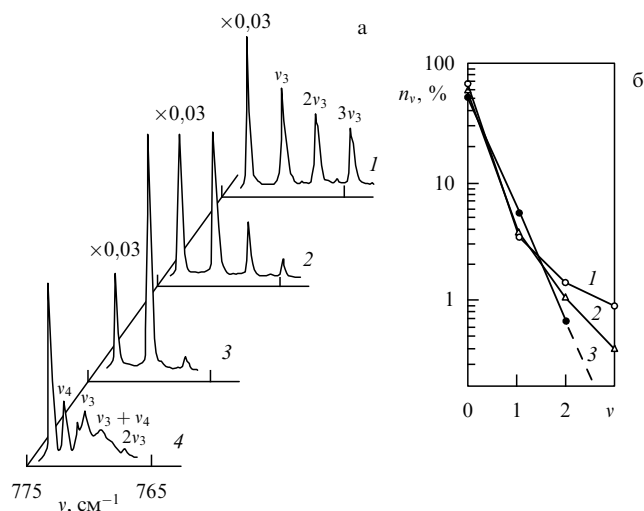


Рис. 9. Трансформация КАРС-спектров молекулы SF_6 (0,05 торр) под действием столкновений при увеличении времени задержки между возбуждением и зондированием: 1 — 50 нс, 2 — 250 нс, 3 — 1 мкс, 4 — 10 мкс (а) и функции распределения населенностей колебательных уровней моды ν_3 , восстановленные на основе спектров 1, 2, 3. Прямая, продолженная штрихами, соответствует бoльцмановской функции распределения энергии [76] (б).

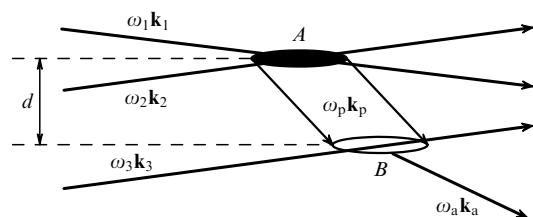


Рис. 10. Схема взаимного расположения возбуждающих ($\omega_1\mathbf{k}_1$, $\omega_2\mathbf{k}_2$) и пробного ($\omega_3\mathbf{k}_3$) пучков в исследуемом кристалле при КАРС на поляритах с разнесенными пучками; A — область возбуждения поляритонов ($\omega_p\mathbf{k}_p$), B — область зондирования [77].

можно было направлять в зону A , где образуется поляритон и вне этой области до зоны B . Положение зондирующего луча можно менять и, таким образом, по КАРС-спектру следить за перемещением поляритона и его эволюцией. На рисунке 11 такая эволюция представлена, а на рис. 12 показано пространственное изменение КАРС-сигнала.

Применение лазеров пикосекундной и субпикосекундной длительности позволит проводить эксперименты с пространственно-временным разрешением, что даст возможность определить дефазировки когерентных поляритонов и их групповую скорость [78–82].

11. Использование ВКР для получения низких температур⁶

В тонких экспериментальных исследованиях, предпринятых для осуществления глубокого охлаждения вещества, эффективно использовано ВКР-излучение для суще-

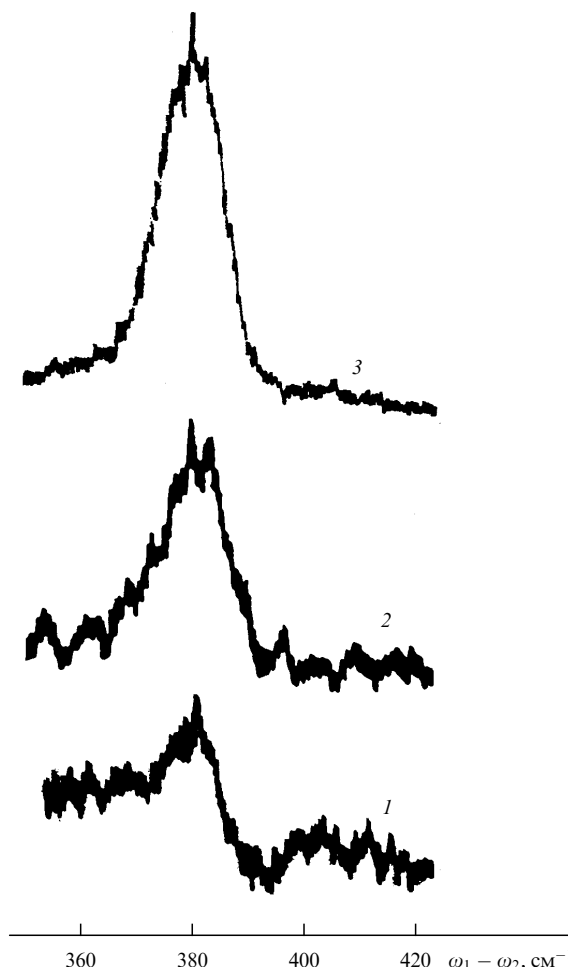


Рис. 11. Спектры КАРС на поляритах в кристалле BeO , полученные при различных расстояниях d пробного пучка от области возбуждения поляритонов (1 — $d = 0$, 2 — $d = 200$, 3 — $d = 400$ мкм) [78].

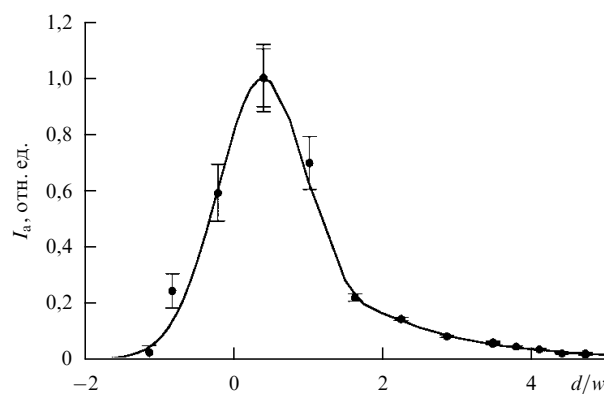


Рис. 12. Зависимость амплитуды сигнала КАРС на поляритах с частотой около 380 см^{-1} в кристалле BeO от нормированного расстояния между возбуждающими и пробными пучками. Точки — эксперимент, кривая — результат расчета, проведенного при подгонке величин относительного вклада прямых и каскадных процессов и длины свободного пробега когерентных поляритонов. Здесь $w = 160\text{ мкм}$ — радиус падающих на кристалл пучков (расстояние, на котором амплитуда поля уменьшается в "е" раз, по сравнению с максимальной амплитудой на оси пучка) [77, 78].

⁶ Краткое и упрощенное изложение основного содержания доклада В.А. Алексеева на заседании Совета по спектроскопии, посвященное 70-летию со дня открытия комбинационного рассеяния света (май 1998 года).

ственного понижения или обращения в нуль скорости поступательного движения атомов. В этих эксперимен-

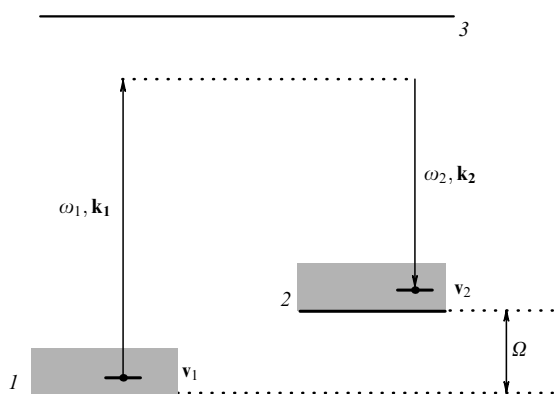


Рис. 13. Схема уровней энергии атома цезия.

тах [83, 84] в парах атомов цезия распространяются два пучка интенсивного света, направленные в противоположные стороны. Разность частот этих пучков света есть $\omega_1 - \omega_2$. Эта разность с точностью до небольшой отстройки δ равна Ω — частоте перехода с уровня 1 на уровень 2 между компонентами сверхтонкой структуры атома цезия (рис. 13). Этот переход сопровождается изменением скорости атомов.

Законы сохранения импульса и энергии связывают величину отстройки δ со скоростью v атомов, вовлекаемых в процесс ВКР:

$$(\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1)v_1 + \frac{\hbar}{2m}(\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1)^2 = \omega_1 - \omega_2 - \Omega = \delta.$$

Здесь $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ — волновые векторы лазерных пучков, v_1 и m — скорость и масса атома. Первый и второй член в левой части написанного выше уравнения есть доплеровский сдвиг и отдача в процессе ВКР.

Таким образом, для каждого значения скорости v_1 атома на уровне 1 имеется такая отстройка частоты δ , которая соответствует уходу с уровня 1 только атомов со скоростью v_1 (см. рис. 13).

Возникает возможность так выбрать спектр накачки, чтобы полностью исключить участие атомов с нулевыми скоростями в процессе ВКР. Для достижения этой цели использовались прямоугольные лазерные импульсы длительностью 30 мкс и с нужным образом подобранными частотами ω_1 и ω_2 . После импульсов с частотами ω_1 и ω_2 другим лазером посылается импульс с частотой, соответствующей переходу с уровня 2 на уровень 3. Атомы цезия переводятся на возбужденный уровень 3, откуда в результате спонтанного распада возвращаются на основной уровень 1.

Далее у лазеров, возбуждающих ВКР, менялись направления волновых векторов, чтобы вовлечь в описываемый процесс атомы с противоположным направлением скорости. Таким образом, осуществлялся циклический процесс переходов из $1 \rightarrow 2$, из $2 \rightarrow 3$, из $3 \rightarrow 1$ с накоплением атомов с нулевыми скоростями на основном уровне 1. Действительно, если скорость атома после спонтанного распада $3 \rightarrow 1$ $v_1 \neq 0$, то атом снова вовлекается в процесс ВКР, но если $v_1 = 0$, то атом исключается из процесса ВКР и остается на уровне 1 (см. рис. 13).

Весь процесс охлаждения длится 20 мс, в течение которого предварительно охлажденные атомы падали

под действием силы тяжести и пролетали через лазерный луч диаметром 4 мм.

Поскольку только атомы с нулевыми скоростями не участвуют в процессе ВКР, происходит их скопление вблизи нулевых скоростей, причем тем более интенсивное, чем дольше длится этот процесс.

Авторы [84] достигли температуры 3 нК = 3×10^{-9} К. По-видимому, это самая низкая температура, достигнутая к настоящему времени.

В этом замечательном эксперименте ВКР играло принципиально важную роль.

12. Лазеры с большой контрастностью импульса и большой энергией и мощностью излучения

Лазеры, работающие на вынужденном комбинационном рассеянии света, хорошо известны и с успехом используются, когда необходимо преобразовать лазерное излучение по частоте, укоротить длительность лазерного импульса и получить некоторые другие характеристики излучения.

Лосеву и Соскову [86] удалось с помощью ВКР процесса весьма сильно повысить контраст единичного импульса. В названной работе импульс рубинового лазера λ 693 нм с энергией 1,5 Дж и длительностью 25 пс вызывал ВКР в жидком SF₆, а затем в сжатом водороде был получен импульс λ 1056 нм с энергией 100 мкДж и длительностью 0,8 пс. После усиления импульс обладал энергией 30 мДж. Двойное преобразование посредством ВКР и надежная развязка между задающим генератором света и усилительной ВКР системой позволило получить контраст, равный 10^{12} , что, по-видимому, является рекордной величиной для контраста импульса лазерного света.

13. Мощный лазер на вынужденном комбинационном рассеянии света

Создание лазеров, излучающих свет интенсивностью порядка 10^{22} Вт/см², которые были бы важны для решения некоторых принципиальных задач, отчасти обсуждавшихся Гинзбургом [54], пока не реализовано, но существенный шаг в создании лазеров с большой энергией в импульсе и большой плотностью потока сделан с применением вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР-лазер).

Усилиями сотрудников Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (И.И. Собельман [87]) и сотрудников НПО "Астрофизика" (Е.М. Земсков [85]) создан импульсный лазер, излучающий огромную энергию и большую мощность при строгой направленности. Подобное устройство уже обсуждалось на примере лабораторной модели [88, 89].

Принцип устройства ВКР-лазера состоит в следующем. Создаются два типа лазеров: 1) лазеры как источники света для накачки, излучающие свет возможно большей энергии; расходимость и другие характеристики не так существенны; 2) лазер (ВКР-лазер), работающий в данном случае на генерации света первой стоксовой линии комбинационного рассеянного света (лазер без инверсной среды). ВКР-лазер должен отличаться большим КПД преобразования света накачки в ВКР, высокой плотностью излучения и малой расходи-

мостью. Поскольку интенсивность вынужденных рассеяний, в том числе и ВКР, зависит от величины интенсивности света накачки, накачку можно осуществлять сразу несколькими лазерами и их не нужно фазировать, а нужно только синхронизировать. ВКР-лазер имеет еще то достоинство, что позволяет выбирать разные длины волн излучаемого света. При создании такого сверхмощного ВКР-лазера возникает много трудностей, которые, однако, удалось преодолеть. На некоторые из них укажем, чтобы перед читателем предстал реально работающий ВКР-лазер.

Как известно, накачка ВКР-лазера может быть осуществлена двумя способами: продольная накачка, когда излучение и преобразованное излучение распространяются в одном направлении, и поперечная накачка, когда направления излучения накачки и преобразованного излучения взаимно перпендикулярны. Преимуществом поперечной накачки является пространственное разделение пучков накачки и стоксова излучения, что имеет важное значение в случае ограниченной лучевой прочности оптических элементов ВКР-лазеров. Однако поперечная накачка обладает существенным недостатком — пространственной неустойчивостью преобразованного излучения: по мере роста мощности стоксовой компоненты процесс генерации стягивается в рабочем объеме к стороне, обращенной к накачке. Распределение выходного излучения становится сугубо неравномерным и мало пригодным для практического применения. Для построения ВКР-лазеров мало пригодна и поперечная, и продольная накачка, ибо в этом случае невозможно получение выходного излучения с плотностью, большей плотности накачки.

В силу этого накачка реального ВКР-лазера должна осуществляться только сходящимся пучком (рис. 14). Поскольку такая накачка является промежуточной между продольной и поперечной, то процесс суммирования в этом случае должен быть промежуточным между этими предельными случаями.

При импульсах накачки с энергией в десятки килоджоулей и длительностях импульса в сотни микросекунд (т.е. при высоких световых нагрузках) классические для исследования рабочие вещества (нитробензол, сероуглерод и др.), не обладая высокой лучевой прочностью, разлагаются. Кроме того при больших длительностях импульсов накачки начинают проявляться и другие нелинейные процессы (рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, самофокусировка и др.), резко снижающие эффективность преобразования в ВКР. В силу этого рабочая среда ВКР-лазеров должна удовлетворять ряду жестких требований. Прежде всего молекулы рабочей среды должны обладать высокой эффективностью ВКР. Во-

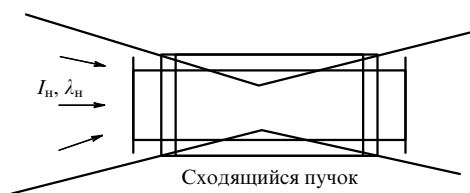


Рис. 14. Схема хода лучей накачки ВКР-лазера сходящимися лучами [85].

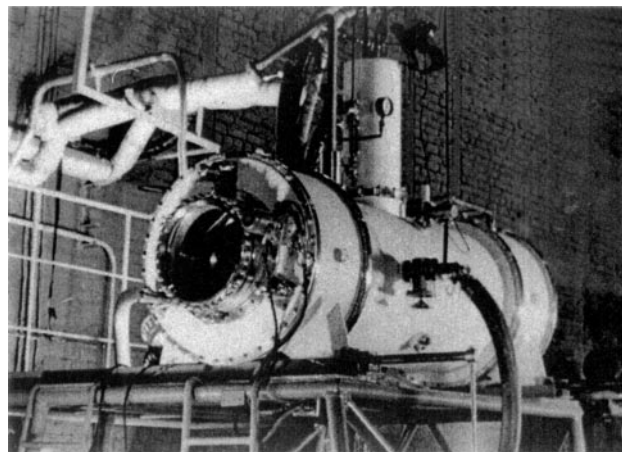


Рис. 15. Общий вид криогенной кюветы ВКР-лазера емкостью 300 л. Рабочий размер кюветы: длина 2000 мм, диаметр 400 мм. Внешние размеры: длина 2700 мм, диаметр 900 мм [85].

вторых, они должны обладать большой лучевой прочностью. Как правило, этому требованию удовлетворяют простейшие молекулы. Этим условиям в полной мере удовлетворяют молекулы азота и кислорода. Поскольку эти газы легко сжижаются, то наиболее приемлемыми рабочими средами для ВКР-лазера, излучающего свет большой энергии, являются жидкий азот и жидкий кислород.

По-видимому, разумной является величина удельного энергоотбора на уровне $2-5 \text{ Дж/см}^3$, и для преобразования энергии накачки в сотни килоджоулей необходим объем рабочего вещества (с учетом балластного объема) 200–300 л (рис. 15).

Необходимость получения расходимости 5×10^{-5} рад требует поддержания однородности температуры по всему рабочему объему с градиентом не более $0,01-0,001 \text{ К/м}$. Это жесткое требование. Удалось найти метод термостатирования при невысоком расходе криогенных жидкостей и создать криогенную камеру объемом 300 л, градиент температуры в которой не превышал $0,01 \text{ К/м}$.

Отметим также, что плотность энергии излучения ВКР-лазера, с которым приходится иметь дело, примерно $2-5 \text{ Дж/см}^2$ при длительности импульса 20 мкс приводит к разрушению стекла в его объеме. Поиски стекла с достаточной лучевой прочностью среди имеющегося разнообразия стекол оказались неудачными. Преодолеть эту трудность удалось только путем создания нового сорта стекла с особо высокой лучевой прочностью. Стекло это имеет марку "СС".

14. Некоторые характеристики описанного выше ВКР-лазера

ВКР-лазер накачивался лазерами, энергия каждого из которых составляла $\sim 10^5 \text{ Дж}$. В экспериментах использовались от 2 до 6 лазеров накачки с длительностью импульса от 20 до 150 мкс. Коэффициент полезного действия составлял 41 %.

В описываемых опытах снималась энергия $6 \text{ Дж с } 1 \text{ см}^3$. Интенсивность излучения ВКР-лазера составляла $10^{15}-10^{16} \text{ Вт/(см}^2 \text{ стерад)}$.



Леонид Исаакович Мандельштам

Диаметр выходящего из ВКР-лазера пучка света равнялся 10–15 см, расходимость светового пучка $\sim 10^{-5}$ рад. Такие лазеры и их усовершенствованные варианты, несомненно, найдут разнообразное применение.

В этом кратком очерке истории открытия и применения комбинационного рассеяния света упомянуты только



Григорий Самуилович Ландсберг

малая часть того, что было сделано, да и то бегло. Очень многое даже не было упомянуто. Например, ничего не сказано о применении КРС для определения индивидуального состава углеводородов — проблема, которой Ландсберг и его ученики и коллеги с успехом отдали много сил.

Даже не упомянуты фундаментальные работы по применению КРС для изучения полимеров и органических молекул и многое, многое другое. Да автор и не ставил перед собой задачу полно рассказать об этом, несомненно, одном из крупнейших открытий XX века, о его развитии и применении. Это дело историков науки и, надеюсь, это дело будет сделано.

Приношу свою глубокую благодарность В.Л. Гинзбургу за существенные замечания, а за большую помощь при составлении статьи — Л.И. Беловой, Т.С. Величиной, В.П. Зайцеву, С.В. Кривохиже и многим моим другим коллегам.

Список литературы

1. Фабелинский И Л *УФН* **126** 124 (1978)
2. Фабелинский И Л *К истории открытия комбинационного рассеяния* (М.: Знание, 1982)
3. Академик Л.И. Мандельштам. *К 100-летию со дня рождения* (Под ред. С М Рытова) (М.: Наука, 1979)
4. Ландсберг Г С *Очерки и воспоминания. К 100-летию со дня рождения* (М.: Наука, 1993)
5. *Воспоминания об академике М.А. Леонтовиче* (М.: Наука, 1990)
6. Ландсберг Г С *Молекулярное рассеяние света. Юбилейный сборник* (М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1947)
7. Ландсберг Г С *Избранные труды* (М.: Изд-во АН СССР, 1958)
8. (а) Ландсберг Г С, Мандельштам Л И *Naturwissenschaften* **16** 557 (1928); *Журн. русск. физико-хим. общества Сер. Физика* **60** 335 (1928); (б) Landsberg Gr, Mandelstam L I *Z. Phys.* **50** 769 (1928)
9. Raman C V, Krishnan K S *Nature* (London) **121** 507 (1928)
10. Raman C V, Krishnan K S *Nature* (London) **121** 711 (1928) (на русск. яз. *УФН* **126** 153 (1978))
11. Raman C V, Krishnan K S *Nature* (London) **122** 12 (1928) (на русск. яз. *УФН* **126** 154 (1978))
12. Raman C V *Nature* (London) **123** 50 (1929)
13. Darwin C G *Nature* (London) **122** 630 (1928)
14. Born M *Naturwissenschaften* **16** 741 (1928)
15. Raman C V *Nature* (London) **123** 50 (1929)
16. Ramanathan K R *Proc. Indian Acad. Sci* **18** 190 (1923)
17. Krishnan K S *Philos. Mag.* **50** 697 (1925)
18. Raman C V *J. Opt. Soc. Am. Rev. Sci. Instrum.* **15** 185 (1927)
19. Вавилов С И *Несколько слов о книге П. Принсхейма и М. Фогеля "Люминесценция жидких и твердых тел"* (М.: Госиздат, 1948)
20. Rutherford E *Proc. R. Soc. London Ser. A* **126** 184 (1929)
21. Хвольсон О Д *Физика наших дней* (М.–Л.: Гостехтеориздат, 1932)
22. Raman C V *Indian J. Phys.* **2** 287 (1928)
23. (а) Bhagavantam S "The discovery of the Raman effect, reminiscences of sir C.V. Raman, in *Proc. Sixth Intern. Conf. Raman Spectroscopy* Vol. 1 (London–Philadelphia–Rheine: Heyden, 1978)
24. Smekal A *Naturwissenschaften* **11** 873 (1923)
25. Kramers H A, Heisenberg W Z. *Phys.* **31** 681 (1925)
26. Плачек Г *Рэлеевское рассеяние и раман-эффект* (М.: ГНТИУ, 1935)
27. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Квантовая электродинамика* (М.: Наука, 1990)
28. Born M, Karman Th *Phys. Z.* **13** 297 (1912); Борн М, Гепперт-Мейер М *Теория твердого тела* (М.–Л.: ОНТИ, 1938)
29. Леонтович М А *Статистическая физика* (М.: Наука, 1983)
30. Борн М, Хуан Кунь *Динамическая теория кристаллических решеток* (М.: ИЛ, 1958)

30. Гинзбург В Л "Почему советские ученые не всегда получали заслуженные ими Нобелевские премии?" *Вестник РАН* **68** 51 (1998)
31. Grawford E, Heilbron J L, Ullrich R *The Nobel Population 1901–1937: A Census of the Nominators and Nominees for the Prizes in Physics and Chemistry* (Berkeley, Calif.: Office for History of Science and Technology, University of California, 1987)
32. Kohlrusch K W F *Der Smekal–Raman–Effekt* (Berlin: Springer, 1938)
33. Кольрауш К *Спектры комбинационного рассеяния* (М.: ИЛ, 1952)
34. Волькенштейн М В, Ельяшевич М А, Степанов Б И *Колебания молекул* (М.: Гостехиздат, 1949)
35. Герцберг Г *Спектры и строение двухатомных молекул* (М.: ИЛ, 1949); *Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул* (М.: ИЛ, 1949); *Электронные спектры и строение многоатомных молекул* (М.: Мир, 1969)
36. Сушинский М М *Спектры комбинационного рассеяния молекул и кристаллов* (М.: Наука, 1969)
37. *Рассеяние света в твердых телах* (Под ред. М Кардоны) Вып. I (М.: Мир, 1975); (Под ред. М Кардоны, Г Гюнтероде) Вып. II (1981); Вып. III (1982), Вып. IV (1984)
38. *Спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах и жидкостях* (Под ред. А Вебера) (М.: Мир, 1982)
39. Летохов В С, Чеботаев В П *Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения* (М.: Наука, 1990)
40. Landsberg Gr, Mandelstam L I *Z. Phys.* **50** 769 (1928)
41. Черлоу Дж М, Порто С П С "Лазерная спектроскопия комбинационного рассеяния в газах", в кн. *Лазерная спектроскопия атомов и молекул* (Под ред. Г Вальтера) (М.: Мир, 1979) с. 293
42. Стерин Х Е Дис. ... канд. физ.мат. наук (М.: ФИАН, 1949); *Изв. АН СССР. Сер. Физ.* **14** 411 (1950)
43. Собельман И И *Изв. АН СССР Сер. Физ.* **17** 554 (1953)
44. Паулинг Л *Природа химической связи* (М.–Л.: Госхимиздат, 1947)
45. Гинзбург В Л *ЖЭТФ* **19** 36 (1949)
46. *Лазерная и когерентная спектроскопия* (Под ред. Дж Стейнфилда) (М.: Мир, 1982)
47. Лисица М П, Яремко А М *Резонанс Ферми* (Киев: Наукова думка, 1984)
48. Ландсберг Г С, Мандельштам Л И *Phys. Z. Sowjetunion* **8** 376 (1935)
49. Мандельштам Л И *Собрание сочинений* (М.: Изд-во АН СССР, 1948–1950)
50. Albrecht A C *J. Chem. Phys.* **34** 1476 (1961)
51. Фабелинский И Л *Молекулярное рассеяние света* (М.: Наука, 1965)
52. Шорыгин П Н *ЖФХ* **21** 1125 (1947); *УФН* **109** 293 (1973)
53. Горелик В С, Митин Г Г, Сушинский М М *ЖЭТФ* **69** 823 (1975)
54. Гинзбург В Л *Теоретическая физика и астрофизика* (М.: Наука, 1987)
55. Агранович В М, Гинзбург В Л *Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов* (М.: Наука, 1979)
56. Поливанов Ю Н *УФН* **26** 185 (1978)
57. *Современные проблемы спектроскопии комбинационного рассеяния света* (М.: Наука, 1978)
58. Ельяшевич М А *Атомная и молекулярная спектроскопия* (М.: Физматгиз, 1962)
59. Клышко Д Н *Фотоны и нелинейная оптика* (М.: Наука, 1980)
60. Горелик В С, Митин Г Г, Сушинский М М *ЖЭТФ* **69** 823 (1975)
61. Витт А, Горелик Г С *ЖТФ* **3** 294 (1933)
62. Гинзбург В Л, Леванюк А П *ЖЭТФ* **39** 102 (1960)
63. Гинзбург В Л, Леванюк А П, Собянин А А "Общая теория рассеяния света вблизи фазовых переходов в идеальных кристаллах", в кн. *Рассеяние света вблизи точек фазовых переходов* (М.: Наука, 1990)
64. Perry C H, Agrawal D K *Solid State Commun.* **8** 225 (1970)
65. Landsberg Gr, Mandelstam L I *Z. Phys.* **58** 250 (1929)
66. Shapiro S M, Cummins H Z *Phys. Rev. Lett.* **21** 1578 (1968)
67. Scott J F *Phys. Rev. Lett.* **21** 907 (1968)
68. Ахманов С А, Хохлов Р В *Проблемы нелинейной оптики* (М.: Изд-во АН СССР, 1964)
69. Бломберген Н *Нелинейная оптика* (М.: Мир, 1966)
70. Келих С *Молекулярная нелинейная оптика* (М.: Наука, 1981)
71. Шен И Р *Принципы нелинейной оптики* (М.: Наука, 1989)
72. Агравал Г П *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1996)
73. Wuogbury E J, Ng W K *Proc. IRE* **50** 2347 (1962)
74. Hellwarth R W *Prog. Quantum Electron.* **15** Part I 3 (1977)
75. Maker P, Terchune R W *Phys. Rev.* **137** 301 (1967)
76. Алимпиев С С и др. *Письма в ЖЭТФ* **38** 349 (1983)
77. Поливанов Ю Н *Квант. электрон.* (в печати)
78. Орлов С Н, Поливанов Ю Н *Квант. электрон.* **25** 175 (1998)
79. Gale G M, Vallee F, Flytzanis C *Phys. Rev. Lett.* **57** 1867 (1986)
80. Vallee F, Flytzanis C *Phys. Rev. B* **46** 13799 (1992)
81. Vallee F, Flytzanis C *Phys. Rev. Lett.* **74** 3281 (1995)
82. Tiegun Q, Maier M *Phys. Rev. B* **56** 5117 (1997)
83. Kasevich M, Chu S *Phys. Rev. Lett.* **69** 1741 (1992)
84. Reichel J et al. *Phys. Rev. Lett.* **75** 4575 (1995)
85. Земсков Е М Дис. ... д-ра физ.-мат. наук (М., 1980)
86. Losev L L, Soskov V I *Opt. Commun.* **135** 71 (1997)
87. Алексеев В А, Собельман И И *ЖЭТФ* **54** 1834 (1968)
88. Dennis J H, Tannenwald P E *Appl. Phys. Lett.* **5** 58 (1964)
89. Грасюк А З *Труды ФИАН* **91** 116 (1977)
90. Barrett J J, Adams N I *J. Opt. Soc. Am.* **58** 311 (1968)

Seventy years of combinational scattering

I.L. Fabelinskii

P.N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences,

Leninskiĭ prosp. 53, 117924 Moscow, Russia

Tel. (7-095) 135-24 11

Fax (7-095) 938-22 51

E-mail: fabelins@sci.lpi.msk.su

The discovery of the combinational scattering of light (alias the Raman effect) is discussed briefly in historical perspective. Landsberg and Mandelstam in Moscow observed spectral lines of the new phenomenon for the first time in crystals on February 21, 1928, and published their results on July 13, 1928, while Raman and Krishnan, in Calcutta, observed similar lines in a number of liquids on February 28, 1928, and published their results on April 21, 1928. Landsberg and Mandelstam gave the right interpretation of the new phenomenon already in their first publication. The reason for the delay of this publication is explained. A brief note is given on the fate of the discovery and of the people who made it. Raman is the only one who was awarded the Nobel Prize in physics in 1930. The list of the 1930 Nobel Prize nominees in physics is given. Developments in the field of combinational scattering are discussed and the role of the phenomenon in applied research and science illustrated.

PACS numbers: **01.65. + g, 78.30. – j**

Bibliography — 90 references

Received 13 July 1998