

«Бюро Квантум» планирует возобновить издание книг научно-популярной серии «Библиотечка «Квант», основанной в 1980 году. За десять лет существования этой серии увидели свет около 80 книг. «Библиотечку» хорошо знали и любили и читатели журнала «Квант».

Одной из книг, которые готовятся к выпуску в рамках серии «Библиотечка «Квант», является книга Д.Свиридова и Р.Свиридовой «Кристаллы в океане электромагнитных волн». Авторы — специалисты в области кристаллографии — увлекательно рассказывают об истории создания современных представлений о природе света, о строении кристаллов и их замечательных свойствах, о новейших экспериментальных методах исследования.

Предлагаем вниманию наших читателей два отрывка из книги. Публикацию подготовила Р.Свиридова.

«Кристаллы в океане электромагнитных волн»

(ГЛАВЫ ИЗ КНИГИ)

Д.СВИРИДОВ, Р.СВИРИДОВА

Человек, который увидел кванты

Квантовая теория строения микромира, созданная в двадцатые годы нашего столетия, требовала экспериментальной проверки. Если излучение происходит порциями-квантами, надо попытаться их увидеть. Мысль, казалось бы, фантастическая. Как экспериментально вести исследования, чтобы подтвердить или опровергнуть теорию квантовой прерывности света? Задача кажется неосуществимой. Поверить в такие возможности зрения мог только человек, прекрасно знающий физиологию зрения и физическую оптику.

Самое трудное в постановке новых научных проблем — это переступить порог существующих представлений об определенных взаимосвязях в природе. Вернер Гейзенберг говорил: «Естествоиспытателя интересует прежде всего постановка вопроса и только во вторую очередь — ответ. Постановка вопроса представляется ему ценной, если она оказалась плодотворной в развитии человеческого мышления. Ответы могут иметь в большинстве случаев лишь временное значение; они могут с течением времени, благодаря расширению наших физических сведений, потерять свое значение».

Такая уникальная проблема была поставлена президентом Академии наук СССР академиком Сергеем Ивановичем Вавиловым (1891 — 1951).

В 1920 году С.И.Вавилов, заведующий отделом физической оптики Института биологической физики Наркомздрава, занялся проблемой световых квантов. В своей последней монографии «Микроструктура света», которая обобщала все его работы по изучению природы света, С.И.Вавилов писал: «...свойства света лучше всего выявляются в предельных условиях развития явления или его исследования: при изучении предельно слабых световых потоков, образуемых малым количеством световых квантов, при изучении процессов, протекающих в миллиардные доли секунды, при изучении взаимодействия молекул на предельно малых расстояниях». Именно такой эксперимент был поставлен по наблюдению световых квантов.

В 1729 году французский ученый Пьер Бугер (1698 — 1758) экспериментально установил закон ослабления света при его прохождении через вещество. Любое вещество поглощает пропускаемый через него свет. Обозначим интенсивность света с длиной волны λ , падающего на слой вещества толщиной d , через J_0 , а интенсивность света, прошедшего

слой, через J . Соответственно закону Бугера,

$$\ln \frac{J}{J_0} = -kd,$$

где k — коэффициент поглощения. Этот закон положил начало всем количественным измерениям поглощения света в веществе. С.И.Вавилов говорил: «Пьер Бугер в своей области является такой же замечательной фигурой, как Кеплер или Ньютон.»

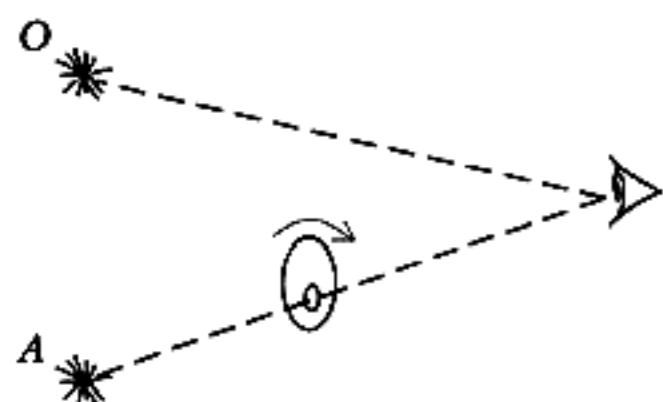
Многочисленными опытами было установлено, что коэффициент поглощения не зависит от интенсивности источника. После создания квантовой теории света пытались обнаружить такую зависимость, изменяя интервал интенсивностей световых пучков в 10^{20} раз. Но коэффициент поглощения оставался неизменным. Однако если существует прерывность светового излучения, если существуют кванты, то при предельно малой интенсивности должны наблюдаться флуктуации. Для последовательных малых промежутков времени количество квантов света, поглощаемого веществом, будет разным — закон Бугера должен нарушаться. Необходимо обнаружить эти статистические квантовые колебания.

Много лет «охотники за квантами» (так называли сотрудников Ва-

вилава) осуществляли этот уникальный опыт. Были взлеты и падения, озарения и разочарования. Только в 1941 году опыт был осуществлен.

Может ли глаз зарегистрировать такой микропроцесс? После многолетних исследований было выяснено, что мгновенно глаз в состоянии зрительно почувствовать несколько квантов (пороговое значение — восемь квантов в секунду). Оказалось, наш глаз в определенных условиях является уникальным прибором, который может заглянуть даже в микромир! Как же осуществить это?

В опыте С.И. Вавилова слабо светящееся пятно *A* малых размеров, яркость которого можно непрерывно ослаблять, регистрируется глазом (см. рисунок). При сильном ослаблении



пятна, когда за секунду в глаз будет попадать немного квантов, должны возникнуть колебания яркости источника. Для наблюдателя источник из постоянного должен превратиться в мигающий. В этом, казалось бы, простом опыте необходимо учитывать несколько фактов, которые необычайно усложняют его осуществление.

Во-первых, очевидно, надо работать с источниками очень малой интенсивности, так как в обычных условиях множество движущихся частиц излучения создают сплошной световой поток.

Во-вторых, необходимо учитывать, что существуют «классические» и квантовые флуктуации света. «Классические» флуктуации, определяемые движением и взаимодействием атомов или молекул источника, связаны с процессами, происходящими внутри источника света. Источник, в котором практически будут отсутствовать такие флуктуации, можно создать. Например, флуоресцирующие молекулы, растворенные в очень вязком веществе, не подверженные возбуждающему или тушающему действию вязкой среды, будут излучать свет непрерывно и постоянно. Кванто-

вые флуктуации при достаточно сильном разрежении должны наблюдаться всегда.

В-третьих, необходима достоверная регистрация глазом этих флуктуаций. Некоторые свойства глаза не позволяют провести эксперимент в таком простом варианте. А именно. Глазное яблоко очень подвижно, поэтому колебания яркости наблюдаются и при больших интенсивностях. Для того чтобы устранить этот недостаток, глаз фиксируют, помещая более яркую (обыкновенно красную) светящуюся точку *O* в стороне от светящейся точки *A*. В центре сетчатки получают изображение этой фиксации точки, а изображение источника *A* получается в стороне, на постоянном расстоянии от центра.

Кроме того, глаз обладает свойством сохранять зрительное впечатление. Это может приводить к тому, что быстрые колебания интенсивности источника будут сливаться, усредняться и размываться глазом. Для того чтобы устранить этот эффект, между глазом и источником помещают диск с одним отверстием. Диск совершает один оборот в секунду, оставляя источник открытым для глаза только во время прохождения отверстия (например, в течение одной десятой секунды).

Эта необычайно простая установка позволила зарегистрировать необычайно сложное явление. Если число квантов больше порогового значения, каждому прохождению отверстия будет соответствовать вспышка. Если же число квантов уменьшается до порогового значения, не всякому прохождению отверстия будет соответствовать видимая вспышка. При постепенном ослаблении яркости такие колебания интенсивности действительно были зарегистрированы. Чем слабее интенсивность источника, тем больше наблюдается пропусков. Зная число пропусков и вспышек, можно статистически определить среднее число квантов, излучаемое за одну вспышку. Таким образом оказалось действительно возможным «воочию убедиться в квантовой, прерывной структуре света.»

Сейчас существуют тончайшие приборы — фотоумножители и счетчики квантов, но первым увидел квант света невооруженный человеческий глаз.

С.В. Вавиловым совместно с В.Л. Лёвшиным было определено так-

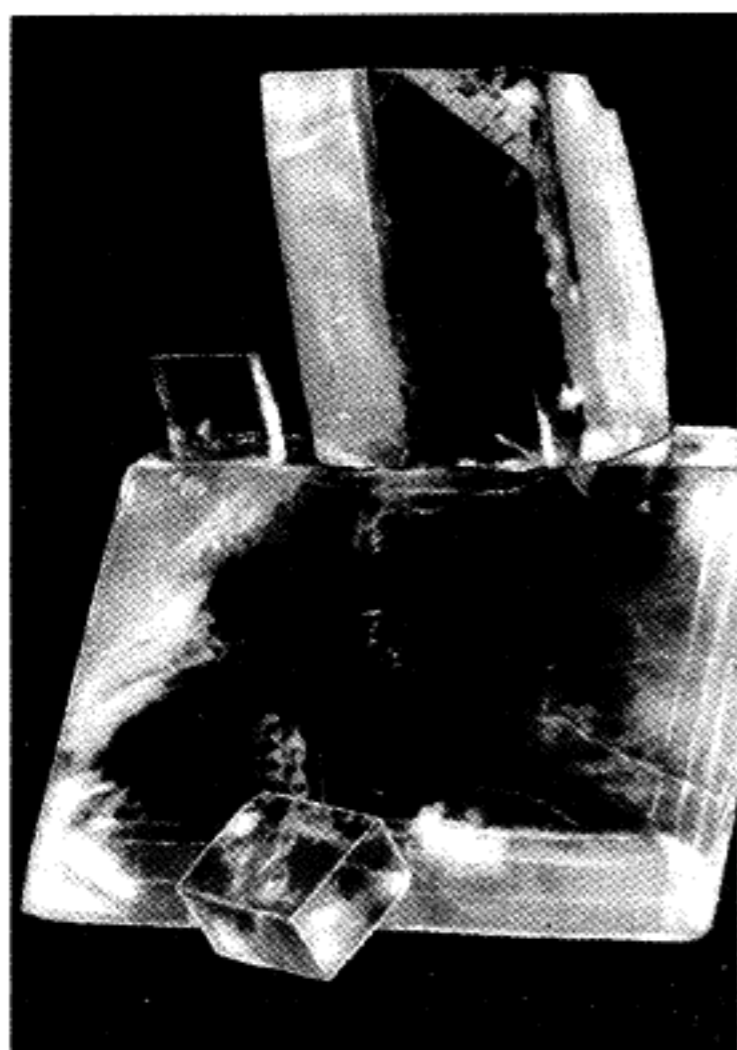
же отклонение от закона Бугера при очень больших интенсивностях. Они наблюдали так называемое просветление кристаллофосфоров при возбуждении их источниками света большой интенсивности. Однако объяснение этих явлений стало возможным лишь после появления новых мощных источников света — лазеров и создания нового направления исследований взаимодействия света с веществом — квантовой электроники.

Свет в кристаллах

Совершенно удивительные и на первый взгляд фантастические явления происходят при распространении света в кристаллах.

В 1669 году из Исландии в Данию были привезены большие куски прозрачных кристаллов кальцита (CaCO_3), которые позднее стали называть исландским шпатом. Изучая оптические свойства этих кристаллов, профессор Копенгагенского университета Эразм Бартолин (1625—1698) обнаружил удивительное их свойство — явление двулучепреломления (двойного лучепреломления).

Это открытие произошло случайно. В том же (1669) году соотечественником Бартолина Николаем Степноном (1638—1685) был установлен один из законов кристаллографии, отражающих высшую гармонию в Природе, — закон постоянства углов. В своем трактате «О твердом, естественно содержащемся в твердом» он сформулировал его следующим образом: «На плоскости число и длина сторон кристалла по-разному изменяются без изменения их углов». Бартолин проверял этот закон, исследуя кристаллы исландского шпата. Обрисовывая грани кристаллов, он сравнивал различные чертежи. Однажды, положив кристалл исландского шпата на чертеж, он увидел, что чертеж раздвоился. Снял кристалл с бумаги. Перед ним лежал один чертеж. Положил кристалл на сделанные записи — и опять то же самое. Все буквы раздвоились. На что бы он ни смотрел сквозь исландский шпат — все удваивалось. В своем трактате «Опыты с двупреломляющим исландским кристаллом, которые привели к открытию чудесного и необыкновенного преломления», изданном на латинском языке в 1669 году, он пишет: «В дальнейшем ходе моего исследования кристалла откры-



лось чудесное и необычайное явление. Предметы, рассматриваемые через кристалл, .. представляются удвоенными».

Если положить кристалл исландского шпата на картон с отверстием, осветив картон снизу, обнаружим, что проходящий через отверстие луч света разлагается на два. Один проходит нормально к пластинке без преломления — его называют обыкновенным. Другой отклонится внутри кристалла в сторону, но выйдет из него по тому же направлению, что и первый луч. Его называют необыкновенным. Свойства этого луча изменяются в зависимости от направления распространения света в кристалле (такая зависимость свойств от направления распространения называется анизотропией). Исследование лучей, прошедших через кристалл, с помощью поляризатора показывает, что оба луча полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Бартолин определил показатель преломления для обыкновенного луча. Для необыкновенного луча он не смог установить никаких закономерностей. Он опубликовал результаты своих работ в Лейпциге, Копенгагене и Лондоне. Однако открытие Бартолина не было признано. Лондонское Королевское общество создало специальную комиссию для проверки результатов (в комиссию вошли Ньютон, Гук, Бойль и др.). Открытие было названо случайным, а законы — не существующими. Ра-

боты Бартолина были забыты, и только двадцать лет спустя в 1691 году голландский физик и математик Христиан Гюйгенс (1629 — 1695) подтвердил правильность открытий Бартолина и обнаружил двулучепреломление света в кварце. В своем «Трактате о свете» он объясняет явление двулучепреломления в исландском шпате на основе созданной им волновой теории света.

В 1801 году французский кристаллограф и минералог Рене Жюст Аюи (1743 — 1822) в «Курсе минералогии» приводит уже целый список двупреломляющих кристаллов. (Он разглядывал тонкую иглу через грани кристалла и для кристаллов с достаточно большим двулучепреломлением наблюдал удвоенную картину.) Аюи впервые разделил кристаллы на однопреломляющие и двупреломляющие и показал, что к однопреломляющим кристаллам относятся вещества, у которых «интегрирующие молекулы отличаются высокой симметрией», т.е. это должны быть кристаллы в форме кубов, октаэдров и т.д.

Удивительное явление двулучепреломления в исландском шпате Исаак Ньютон пытался объяснить особым расположением частиц в кристалле. Он писал: «Частицы исландского кристалла действуют на лучи все в одном направлении, вызывая необыкновенное преломление. Поэтому нельзя ли предположить, что при образовании этого кристалла не только установились в строй и ряды, застывая в правильных фигурах, но также посредством некоторой полярной способности повернули свои одинаковые стороны в одном направлении частицы, составляющие этот кристалл?».

С правильным строением кристаллов связывал двулучепреломление и Гюйгенс. Он говорил: «По-видимому правильность, которая обнаруживается в этих произведениях Природы (кристаллах), вызывается расположением составляющих их мельчайших невидимых и равных частиц. Исландский же шпат состоит из маленьких круглых телец, не сферических, но сплюснутых, сфероидальных».

Теорию распространения света в кристаллах дал французский физик Огюстен Френель (1788 — 1827). Он показал, что в кристаллах распространяются (в общем случае) две волны, поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях. Им про-

ведена классификация кристаллов по типу оптических поверхностей, рассмотрены вопросы эллиптической и круговой поляризации, вращения плоскости поляризации, указано на возможность существования конической рефракции, количественно установлены законы отражения и преломления света, которые дают возможность определить интенсивность и поляризацию света после преломления и отражения.

С чем же связано явление двулучепреломления?

За счет действия поля электромагнитной волны происходит смещение электронных оболочек относительно атомных ядер. В ионных решетках, кроме того, смещаются отдельные ионы относительно друг друга. Однако это смещение происходит лишь при низких частотах (инфракрасная часть спектра), так как их большая масса не позволяет следовать за полем высокой частоты. Это смещение заряженных частиц называется электрической поляризацией кристалла. Электрическая поляризация, в свою очередь, приводит к появлению электромагнитного поля, накладывающегося на поле первоначальной волны. Если поляризация кристалла зависит от направления электрического поля волны, то появляется анизотропия диэлектрической проницаемости и коэффициента преломления. Анизотропия в коэффициенте преломления и приводит к возникновению двулучепреломления.

Рассмотрим двулучепреломление в кристаллах, состоящих из вытянутых не сферических молекул, длина которых больше их ширины, причем молекулы выстроены так, что их большие оси параллельны. Если на кристалл падает электромагнитная волна, то такая структура молекул способствует тому, что электроны поддаются легче колебаниям вдоль оси молекулы, чем поперек нее. Электрическое поле волны, направленное вдоль осей молекул, будет вызывать один эффект, а электрическое поле, направленное под прямым углом к оси молекулы, совсем другой. Таким образом, распространение этих двух волн будет происходить с различными скоростями, а следовательно, и с различными показателями преломления, т.е. возникнет двулучепреломление.