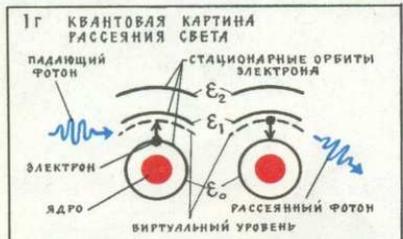
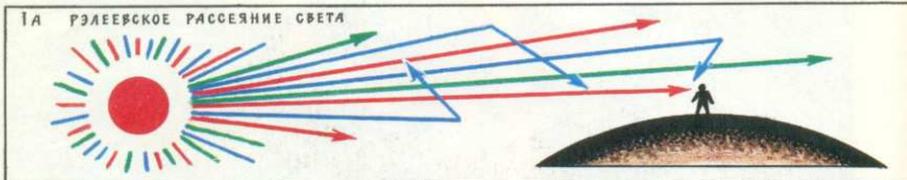


Р А С С Е Я Н И Е

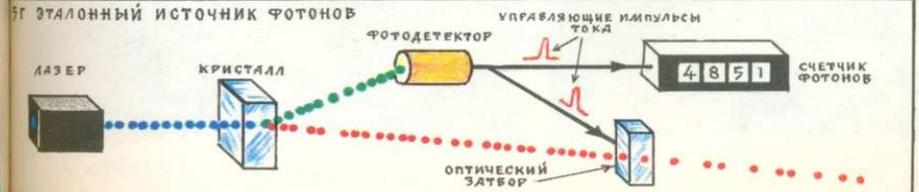
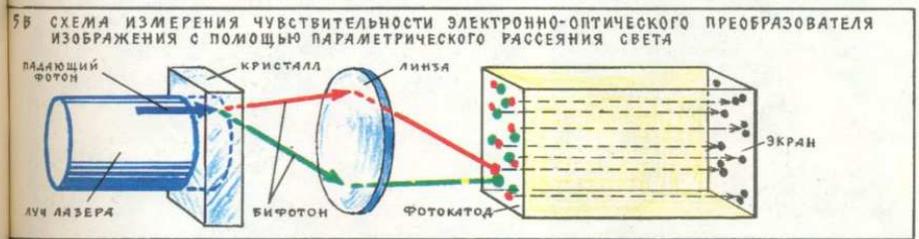
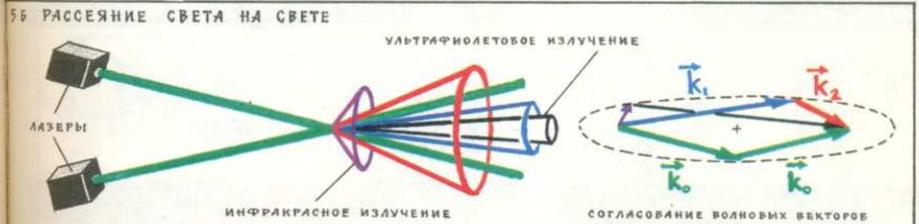
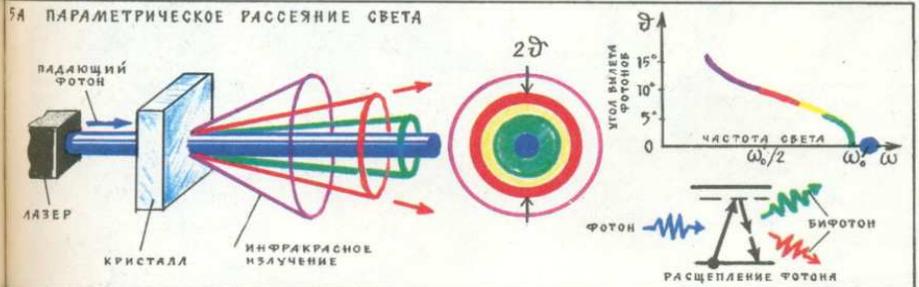
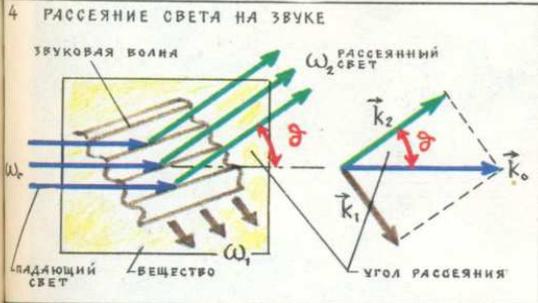
(см. статью на стр. 26).



С В Е Т А



Фотографическое изображение параметрического рассеяния света. Это явление можно наблюдать невооруженным глазом.



РАССЕЯНИЕ СВЕТА

Наслаждаясь видом безоблачного неба, мы вряд ли склонны вспоминать о том, что небесная синева - это одно из проявлений рассеяния света. Оказывается, синие лучи, падающие на Землю от Солнца, рассеиваются молекулами воздуха примерно в 6 раз сильнее своих «антагонистов» в видимом спектре—красных, и поэтому небо выглядит голубым, а солнце тем краснее, чем оно ближе к горизонту. Так объяснил голубой цвет неба в 1871 году знаменитый английский математик и физик Джон Уильям Стратт, почти тогда же унаследовавший от отца титул лорда Рэля, и с тех пор рассеяние света на отдельных атомах или молекулах и вообще на маленьких частичках — с размерами, намного меньшими длины световой волны, называют рэлеевским.

В чем же причина того, что синие лучи рассеиваются в атмосфере гораздо сильнее красных? Дело в том, что луч света представляет собой электромагнитную волну (точнее, набор волн), электрическое поле которой периодически меняется — осциллирует — и вынуждает колебаться с такой же частотой электронное облако, окружающее атом. Но при этом колеблющиеся электроны сами становятся источниками вторичных электромагнитных волн (16). Похожее явление можно наблюдать на поверхности воды, когда волна, набегающая издалека на поплавок, заставляет его колебаться вверх вниз, и поплавок сам начинает «излучать» расходящиеся круги (1 в).

Амплитуда волн, испускаемых движущимся электроном, пропорциональна его ускорению — чем резче меняется скорость заряда, тем труднее удержаться возле него связанному с ним «собственному» электромагнитному полю. Ведь всякое поле обладает энергией, а следовательно, инертной массой и поэтому может не успевать за быстро колеблющимся в падающей световой волне электроном, отрываясь от него. Это и есть излучение вторичных волн, или рассеянный свет. Интенсивность его тем выше, чем быстрее колеблется электронное облако, то есть рассеяние возрастает с частотой падающего света, или, что то же самое, уменьшается с увеличением длины волны (длина волны обратно пропорциональна частоте). Потому-то синие лучи и рассеиваются сильнее красных— их длины волн равны соответственно 0,45 мкм и 0,7 мкм.

Лучи, волны, «трясущиеся» электроны — все это атрибуты классической теории. К сожалению, несмотря на привычность таких образов, классический язык не всегда оказывался удобным для точного описания рассеяния света, и поэтому физики предпочитают говорить об этом явлении на языке квантовой теории. С квантовой точки зрения рэлеевское рассеяние происходит в два этапа: сначала атомный электрон поглощает налетающий квант света — фотон и на короткое время переходит на временный, промежуточный уровень энергии (в квантовой механике его называют виртуальным, от латинского слова *virtualis* — способный, достойный), а затем возвращается обратно, излучая фотон с той же энергией частотой, но с другим —случайным, вероятностным — направлением распространения (1 г).

Электроны, не связанные в атомах, а свободные —например, в плазме — тоже раскачиваются светом и рассеивают его в стороны. В частности, именно благодаря этому эффекту мы можем наблюдать свечение солнечной короны (1 д) и, следовательно, получать информацию о стратосфере

Солнца. А в земных лабораториях рэлеевское рассеяние служит надежным инструментом для исследования размеров и скоростей молекул, в частности при лазерном зондировании атмосферы.

Итак, рассеяние света связано с вынужденными колебаниями атомных электронов в поле падающей световой волны. Но ведь электроны не только «встряхиваются» полем волны, они участвуют и в других движениях, например, во внутриатомном «вращении» вокруг ядра или, скажем, колеблются вместе с атомами в молекуле. Оказывается, что такие «собственные» движения электронов сильно влияют на рассеяние световых волн. Если, например, частота падающего на атом света совпадает с одной из собственных частот атома, то возникает резонанс и атомные электроны раскачиваются падающим светом гораздо сильнее, чем «вдали» от резонанса. Соответственно интенсивность рассеянного света резко увеличивается. Это явление было обнаружено в 1905 году знаменитым американским экспериментатором Робертом Вудом и стало называться резонансной флуоресценцией.

С квантовой точки зрения для атомного резонанса необходимо, чтобы энергия падающего фотона совпала с энергией одного из уровней атома (2). Большая величина эффекта резонансной флуоресценции при лазерном возбуждении позволяет регистрировать с ее помощью одиночные атомы (это важно, например, при исследовании химических реакций), а также ускорять или тормозить атомы благодаря «отдаче» при переизлучении фотона. Отдача, возникающая, когда из атома вылетает фотон, по существу, представляет собой давление света, ее так и называют — резонансное световое давление. Примерно десять лет тому назад с помощью резонансной флуоресценции был обнаружен новый и очень интересный эффект — так называемая антигруппировка фотонов, когда в их случайном, вероятностном потоке вдруг возникает упорядоченность и фотоны начинают приходить на детектор с завидной регулярностью, как бы по расписанию. До сих пор мы интересовались рассеянием света на атомах. Однако большинство веществ состоит не из изолированных атомов, а из взаимодействующих друг с другом молекул. Как же отражается молекулярное строение вещества на рассеянии света? Как оказалось, молекулярное рассеяние света намного разнообразнее атомного. Если, например, вещество состоит из двухатомных молекул, то атомы в нем объединены общей внешней электронной оболочкой, они как бы обволакиваются электронным облаком (3а). Расстояние между атомами из-за теплового движения периодически меняется с некоторой характерной для данной молекулы частотой — молекула «дышит». С той же частотой электронная оболочка меняет свою форму и, следовательно, рассеивающую способность. Частота молекулярного «дыхания» зависит от масс атомов, составляющих молекулу, и обычно примерно на порядок меньше частоты видимого света. Поэтому тепловые колебания молекул приводят к сравнительно медленным изменениям — модуляции — амплитуды рассеиваемого света, и при его спектральном анализе это проявляется в виде двух боковых линий — «сателлитов», расположенных симметрично по обе стороны от «главной» рэлеевской спектральной линии (3б). Чем больше в молекуле атомов, тем разнообразнее набор ее внутренних движений и соответственно богаче спектр рассеянного ею света. Иными словами, между структурой молекулы и частотой спектральных компонентов, появляющихся при рассеянии, имеется жесткая связь, поэтому число таких компонентов и их положение в спектре позволяют определить состав и структуру молекул. Изменение частоты света при рассеянии на молекулах было обнаружено в 1928 году двумя выдающимися советскими физиками — Г. С. Ландсбергом и Л. И. Мандельштамом и независимо от них, хотя и несколько позже, индийскими

физиками Ч. Раманом и К. Кришнаном. Это явление часто (и не совсем справедливо) называют рамановским рассеянием, в советской же литературе принят термин «комбинационное рассеяние света». На языке квантовой теории комбинационное рассеяние объясняется тем, что молекула в результате взаимодействия с налетающим и испущенным фотонами переходит на другой колебательный энергетический уровень (3в). Сравнение 3в и 2 наталкивает на мысль, что чем сложнее организована рассеивающая материя, тем богаче картина рассеяния света. А что будет, если не только атомы ассоциируются в молекулу, но и молекулы объединяются друг с другом, образуя конденсированное вещество? Ведь в таком веществе становятся возможными совершенно новые, коллективные формы движений, проявятся ли они как-нибудь при рассеянии света? Оказывается, да, и очень ярко. Если, например, через вещество распространяется звуковая (или ультразвуковая) волна, возбужденная за счет тепловой энергии, то в каждой точке вещества происходит его периодическое разрежение и сжатие, а значит, и периодическое изменение его оптических свойств — показателя преломления. Но тогда проходящий через среду свет будет рассеиваться колебаниями ее показателя преломления — оптическими неоднородностями (4а), причем интенсивность рассеянного света окажется промодулированной с частотой звука, как и при рассеянии на колеблющейся молекуле (3а). Однако здесь есть важное отличие: при рассеянии света на звуке рассеивает не отдельная молекула, а волна, то есть коллективное движение сразу многих молекул. У света, рассеянного на волнах, имеется интересная особенность: его частота зависит от направления распространения, точнее, от угла рассеяния (4б). Дело в том, что световые волны, рассеянные от разных гребней звуковой волны, складываясь, не гасят друг друга лишь при подходящих фазовых соотношениях. Например, для рассеяния назад нужно, чтобы длина звуковой волны была вдвое меньше световой. Рассеяние на тепловых звуковых волнах называют рассеянием Мандельштама — Бриллюэна, по имени выдающихся советского и французского физиков, независимо предсказавших этот эффект в 20-х годах нашего столетия. Рассеяние Мандельштама — Бриллюэна применяется, в частности для измерения скорости ультразвука в веществе. Однако в веществе могут распространяться не только звуковые, но и всякие другие волны, например, тот же свет. При этом оптические свойства вещества тоже изменяются, но уже не вследствие чередования уплотнений и разрежений, а из-за вынужденных колебаний электронов в электромагнитном поле волны. По этому для другой световой волны вещество становится неоднородным, и она частично рассеивается, то есть возникает третья волна, частота которой равна разности первых двух. Условие синфазности — волны, рассеянные от разных гребней, не должны гасить друг друга — здесь также приводит к тому, что частота появляющейся новой волны зависит от направления ее наблюдения (5а, б), причем когда свет рассеивается на свете, эта зависимость гораздо более сильная, чем при рассеянии света на звуке. Оказывается, что частота рассеянной волны изменяется в широком интервале и из проходящего через вещество пучка синего или ультрафиолетового света под небольшими углами излучаются все цвета радуги (5а).

На языке квантовой теории этот эффект объясняется «расщеплением» фотонов проходящего света на пары фотонов с меньшими энергиями (5в), а условие синфазности имеет смысл закона сохранения импульса. Эффект расщепления фотонов называют также параметрическим рассеянием света. Оно было обнаружено примерно 20 лет тому назад одновременно в трех университетах — Московском, Стэнфордском и Корнеллском (два последних — в США). Сегодня параметрическое рассеяние широко используется для измерений оптических

характеристик кристаллов, яркости света и эффективности фотодетекторов. В качестве одного из возможных важных приложений этого эффекта на вкладке изображена схема измерения чувствительности электронно-оптического преобразователя изображений (ЭОП). Современный ЭОП — незаменимый инструмент для сверхвысокоскоростной фотографии и чувствительной регистрации быстропротекающих процессов (см. «Наука и жизнь» № 9, 1981 г.), с вероятностью порядка 10% эти приборы «видят» отдельные фотоны. При параметрическом рассеянии фотоны рождаются по двое, они как бы сгруппированы в пары. Поэтому на люминесцентном экране ЭОП с разной вероятностью будут вспыхивать одиночные и двойные точки, и, подсчитав относительное число двойных точек, можно найти эффективность электронно-оптической регистрации. Другой пример необычных возможностей эффекта параметрического рассеяния — генерация известного числа фотонов с определенными моментами вылета ($5e$). Напомним, что для всех имеющихся источников света число излученных за какое-то время фотонов, а также моменты их вылета неизвестны, это проявление фундаментальных закономерностей квантовой механики. А вот при параметрическом рассеянии, когда фотоны рождаются парами, одним из них ради информации можно пожертвовать. Для этого используется фотодетектор, выходные электрические импульсы которого направляются на пересчетную схему. Кроме того, эти же импульсы управляют оптическим затвором, который открывается на короткое время и в точно известный момент пропускает один из фотонов-близнецов. Так, с помощью параметрического рассеяния можно проверить самые главные положения квантовой механики. Спустя год после открытия параметрического рассеяния света в Ленинградском физико-техническом институте наблюдался аналогичный эффект с участием не одного падающего фотона, а двух ($5g$). Очень интересно то, что этот эффект возможен и в полном вакууме — обычно именно такую ситуацию, когда два падающих пучка сводятся в вакууме, называют рассеянием света на свете. Взаимодействие волн при этом очень слабое, оно происходит за счет рождения виртуальных электронов и позитронов, то есть «пробоя» вакуума в сильном световом поле. Иными словами, вакуум здесь в полной мере должен проявлять себя как физическая среда. Однако, к сожалению, рассеяние света на свете в полном вакууме еще не наблюдалось.

*Доктор физико-математических наук
Д. КЛЫШКО
«Наука и жизнь», № 01 1988 г.*