

Приложение к журналу

КВАНТ

№4/99

СБОРНИК СТАТЕЙ
В.А.ФАБРИКАНТА

Бюро



Квантум

СБОРНИК СТАТЕЙ
В.А.ФАБРИКАНТА

Составители
В.А.Тихомирова, А.И.Черноуцан



Москва 1999
Бюро «Квантум»

УДК 53(082)
ББК 22.3
С23

Приложение
к журналу «Квант»
№4/99

**С23 Сборник статей В.А.Фабриканта / Составители
В.А.Тихомирова, А.И.Черноуцан. — М.: Бюро Квантум,
1999. — 128 с. (Прил. к журналу «Квант» №4/99)
ISBN 5-85843-019-8**

Книга представляет собой сборник научно-популярных статей по физике, написанных для журнала «Квант» известным современным ученым и педагогом Валентином Александровичем Фабрикантом.

Для учащихся и преподавателей средних школ, лицеев и гимназий, а также для всех тех, кому интересна физика.

ББК 22.3

ISBN 5-85843-019-8

© Бюро Квантум
«Квант», 1999

СОДЕРЖАНИЕ

Парадокс Вавилова	6
Закон Джоуля – Ленца	11
Что происходит в гелий-неоновом лазере	21
Сюрпризы зеленого стекла	35
Исаак Ньютон и яблоко	44
Леонид Исаакович Мандельштам	48
Физика люминесцентных ламп	58
Можно ли услышать рев мамонта?	71
Рождение кванта	76
Физика и суд	85
Стабилизированный одноатомный водород	87
Что такое нелинейная оптика	90
Первые шаги Нильса Бора в науке	100
Волк, барон и Ньютон	109
Зачем мы зимой используем отопление?	115
Моя первая научная неудача	118
Вариационные принципы	124



ПРЕДИСЛОВИЕ

Среди создателей и активных участников издания журнала «Квант» было много значительных ученых и педагогов. Но даже в этом ярком созвездии свое особое место занимает Валентин Александрович Фабрикант.

Валентина Александровича можно назвать человеком-легендой. Многие физики знают, что он чуть-чуть не получил Нобелевскую премию, за двадцать лет до открытия лазеров вплотную приблизившись к формулировке основных идей квантового усиления света, — об этом рассказывается в статье «Моя первая научная неудача». Несмотря на эту «неудачу», Валентин Александрович сумел сделать множество замечательных открытий, воспитать плеяду учеников, написать прекрасные статьи и книги, получить Государственную премию, стать доктором физико-математических наук и действительным членом Академии педагогических наук.

Являясь бессменным членом редакционной коллегии журнала «Квант» с момента его основания, Валентин Александрович был большим другом читателей и редакции. Когда Валентин Александрович приходил в редакцию, его деликатность, обаяние и интеллигентность привлекали к нему окружающих, создавали вокруг него ту атмосферу аристократии духа, которая ассоциируется у нас сегодня с университетской жизнью начала века.

Валентин Александрович тратил много сил на тщательную подготовку всех своих популярных статей. С нашей точки зрения, каждая из этих статей представляет собой настоящую жемчужину научно-педагогической мысли. Поэтому не случайно в качестве первого физического приложения, посвященного работам одного автора, мы подготовили сборник статей Валентина Александровича Фабриканта.

В геометрической оптике часто и плодотворно применяется понятие о пучке параллельных световых лучей, имеющем конечное поперечное сечение. Более того, даже в теории такого волнового явления, как интерференция, во многих случаях допустимо использование этого понятия.

Во многих случаях, но далеко не во всех. В книге «Микроструктура света» известного советского физика С.И.Вавилова разобран весьма поучительный в этом смысле оптический парадокс.

Напомним коротко, как выглядит энергетика интерференционной картины. Интерференция, как мы знаем, есть сложение колебаний. В нашем случае в волнах колеблются значения напряженности электрического и индукции магнитного полей. Эти величины в каждой точке пространства в каждый момент времени определяют энергию электромагнитного поля. Электромагнитная волна переносит энергию, и можно ввести понятие о плотности потока энергии — так мы называем величину, равную энергии поля, протекающей в единицу времени через единицу поверхности.

Каждая волна характеризуется еще и фазой. Если при сложении двух световых пучков разность их фаз остается все время одной и той же, мы говорим, что имеем дело с когерентными пучками.

В интерференционной картине, возникающей в результате сложения двух когерентных пучков, происходит пространственное перераспределение световой энергии. В светлых полосах энергия больше, чем сумма энергий складываемых пучков; в темных полосах она, наоборот, меньше. Избыток энергии в светлых полосах как раз компенсируется недостатком ее в темных. Полная энергия, распределенная по всей интерференционной картине, точно равна сумме энергий двух интерферирующих пучков.

На рисунке 1 показана зависимость плотности потока энергии в интерференционной картине от смещения по экрану, на котором она наблюдается. Картина получена при сложении двух когерентных световых пучков равных энергий. Горизонтальная пунктирная линия изображает сумму плотностей потоков энергий в складываемых пучках. Части кривой, идущие над этой прямой, соответствуют светлым интерференционным полосам, а части кривой, лежащие под пунктирной прямой, – темным. Суммарная энергия, распределенная в интерференционной картине, изображается площадью под кривой. Эта площадь точно равна площади под пунктирной прямой. Требования строгого бухгалтера природы – закона сохранения энергии – выполняются неукоснительно.

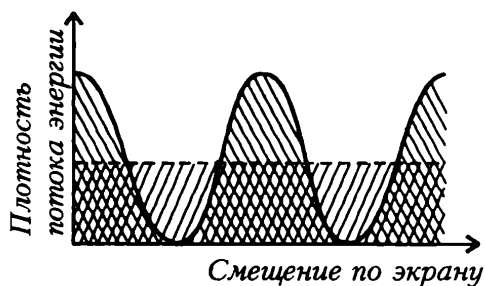


Рис. 1

Перейдем теперь к парадоксу Вавилова. Представьте два совершенно одинаковых когерентных резко ограниченных световых пучка шириной a , пересекающихся под малым углом α (рис. 2). В области $ABCD$ происходит интерференция. Для наблюдения интерференционной

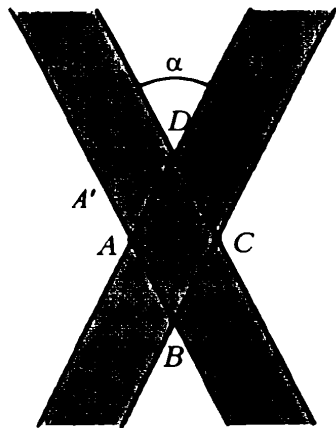


Рис. 2

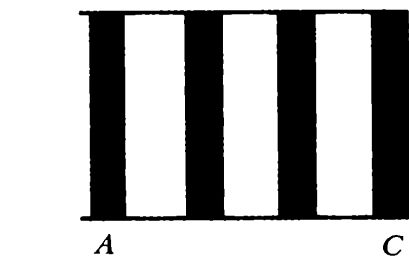


Рис. 3

картины можно установить экран, перпендикулярный плоскости чертежа, проходящий через точки A и C . Интерференционная картина будет состоять из прямолинейных чередующихся светлых и темных полос, заполняющих экран от точки A до точки C (рис. 3).

Распределение плотности потока энергии в интерференционной картине соответствует графику на рисунке 1. Если у обоих пучков одинаковые начальные фазы световых волн колебаний, то разность фаз световых волн первого и второго пучков в точках, лежащих на прямой BD , будет равна нулю. Она соответствует, таким образом, середине центральной светлой полосы. В середине соседней темной полосы разность фаз должна быть равна π , иными словами, световые колебания в обоих пучках должны быть в противофазе. Разность фаз $\Delta\varphi$ равна разности хода ΔL обеих волн до данного места, деленной на длину волны λ и умноженной на 2π :

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda}. \quad (1)$$

Увеличению длины пути, проходимого волной, на λ соответствует запаздывание фазы на 2π . Из формулы (1) следует, что в середине ближайшей к центру интерференционной картины темной полосы ΔL должно быть равно $\lambda/2$.

Подсчитаем разность хода в точке A . Параллельный пучок можно рассматривать как поток плоских волн, перпендикулярных направлению световых лучей. Проведем через точку D (см. рис.2) одну из волновых поверхностей (поверхностей равной фазы) первого пучка. На этой волновой поверхности лежат точки D и A' . Пути, проходимые обоими пучками до точки D , одинаковы. Для того чтобы попасть в точку A , волновая поверхность первого пучка, проходившая ранее через точку D , должна сместиться на отрезок AA' , а волновая поверхность второго пучка, проходившая ранее также через точку D , должна сместиться на отрезок DA . В результате возникает разность хода

$$\Delta L = DA - A'A = a \left(\frac{1}{\sin \alpha} - \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) = \frac{2a \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{\sin \alpha} = a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

Ясно, что такая же разность хода, но с обратным знаком, будет в точке C . Начнем теперь уменьшать угол α . При достаточно малом α можно сделать ΔL равным $\lambda/4$. Тогда вся область AC будет заполнена одной светлой интерференционной полосой. Следовательно, всюду энергия будет превышать сумму энергий двух пересекающихся пучков. Ника-

кой компенсации за счет образования темных полос нет, так как они вообще отсутствуют!

Можно получить и, так сказать, негативный результат, заставив пересекаться пучки с начальной разностью фаз, равной π . Тогда область АС будет заполнена только одной темной интерференционной полосой.

В первом случае непонятно, откуда берется дополнительная энергия, во втором – неясно, куда исчезает энергия.

Оба случая явно противоречат закону сохранения энергии. Очевидно, в наших рассуждениях есть какой-то дефект, приводящий к противоречию с одним из основных законов природы. Чтобы понять, в чем здесь дело, запишем формулу (2) для случая, когда $\Delta L = \lambda/4$, и воспользуемся при этом малостью угла α ($\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$ для малых α). Тогда получим

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{a\alpha}{2}, \text{ или } \alpha = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{a}. \quad (3)$$

Покажем, что угол α действительно должен быть малым. Возьмем $a = 1$ см, $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см, тогда $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-5}$ рад. Мы видим, что неприятности с законом сохранения энергии возникают при угле между пучками порядка отношения длины волны к величине поперечного сечения пучка.

Решение парадокса заключается в том, что при таких малых углах уже нельзя пользоваться понятием идеального параллельного пучка конечного сечения. При любой попытке реализовать такие пучки мы потерпим неудачу. Ограничение размеров пучка благодаря явлению дифракции с необходимостью приводит к превращению его в расходящийся пучок. Угол расхождения пучка определяется как раз формулой (3). При этом, естественно, угол, под которым пересекаются пучки, можно определить лишь с точностью до величины порядка угла расхождения пересекающихся пучков.

Если бы дифракция еще не была открыта, мы на основании закона сохранения энергии и формулы (3) должны были бы не только догадаться о ее существовании, но и указать на основную закономерность, управляющую величиной дифракционного угла. Это хороший пример того, что закон сохранения в физике всегда может служить надежной путеводной звездой.

Взяв реальные световые пучки, мы никогда, конечно, не получим противоречия с законом сохранения энергии. В интерференционных опытах данного типа всегда дело будет сводиться к пространственному перераспределению потока энергии.

Есть, однако, интерференционные эксперименты, где возникают еще более тонкие энергетические парадоксы, но это, как говорится, уже другая история.

Нагревание проводника при прохождении электрического тока – один из наиболее привычных эффектов. Однако более внимательный анализ механизма возникновения джоулева тепла показывает, что здесь далеко не все так просто.

В статье рассматриваются явления, связанные с эффектом Джоуля – Ленца. В плазме электрического разряда в газах могут существовать в одном и том же объеме две температуры, отличающиеся в сотни раз. Такая плазма представляет собой как бы смесь двух газов с резко различающимися температурами. Эти температуры не могут стать равными из-за того, что электрическое поле нагревает только один из газов и между газами имеется надежная «шуба».

Инженер, рассчитывающий линию дальней электропередачи, и инженер, создающий мощную электропечь, имеют диаметрально противоположные точки зрения на джоулево тепло, выделяющееся в проводнике при прохождении тока. Для первого это – вредный эффект, заставляющий повышать напряжение и мечтать о сверхпроводящем кабеле; для второго – полезный эффект, позволяющий решать трудные технологические проблемы. Однако оба они согласятся, что эффект этот весьма важный.

Закон, по которому проводник нагревается электрическим током, был впервые экспериментально установлен в 1841–42 годах английским физиком Джеймсом Джоулем и, независимо от него, несколько позднее (в 1842–43 гг.), но с гораздо большей точностью – петербургским академиком Эмилием Христиановичем Ленцем.

Начав исследовать выделение тепла при прохождении тока, Джоуль увлекся более общей проблемой – преобразованием энергии. В частности, он занялся преобразованием

работы в тепло, используя в качестве промежуточного звена электрический ток.¹

Для первых опытов Джоуль сделал довольно простой прибор, состоявший из стеклянной банки, наполненной водой, в которую опускалась стеклянная трубка с навитым на нее проводником и с термометром для измерения температуры воды. Источником электродвижущей силы служила батарея гальванических элементов. Измерялось повышение температуры воды за определенный промежуток времени при прохождении тока.

Установив основные закономерности нагревания проводника при прохождении тока, Джоуль пришел к мысли, что этот эффект возникает за счет теплопроводности. Согласно его гипотезе, тепло, выделяющееся в гальванической батарее, вследствие теплопроводности распространяется вдоль проводника и нагревает его.

Для проверки этой гипотезы Джоуль построил гораздо более сложный прибор. Вместо гальванической батареи в этом приборе для получения тока использовался индукционный генератор со статором в виде мощного электромагнита, между полюсами которого вращался в сосуде с водой ротор. Измерялся нагрев воды при замкнутой и разомкнутой обмотке ротора. Разность этих нагревов, очевидно, вызывалась тепловым действием тока, индуцированного в обмотке ротора. Джоуль убедился в ошибочности своей гипотезы о роли теплопроводности и пришел к правильному истолкованию явления нагревания проводников.²

Установление точного закона выделения тепла при прохождении электрического тока было далеко не простой экспериментальной задачей для физика первой половины XIX века. Ленц подошел к решению этой задачи с большой тщательностью, как первоклассный экспериментатор. Он начал с создания новых измерительных приборов и их калибровки, что потребовало много труда.

¹ Попутно Джоуль пришел к выводу, что электрические моторы не смогут конкурировать с паровыми машинами из-за дороговизны получения электрического тока! Вывод для середины XIX века вполне обоснованный.

² Нагревание воды при вращении ротора с разомкнутой обмоткой явно натолкнуло Джоуля на идею его знаменитого прибора для определения механического эквивалента теплоты. Опыты Джоуля с этим прибором сыграли большую роль в обосновании закона сохранения энергии. Поэтому единица энергии вполне заслуженно носит его имя.

В частности, для измерения тока он построил так называемый мультипликатор – прибор, в котором измеряемый ток проходит сквозь неподвижную обмотку, состоящую из нескольких витков провода. В центре обмотки подвешена магнитная стрелка. Поворот стрелки связан с величиной проходящего сквозь обмотку тока. До мультипликаторов применяли приборы с обмоткой, состоявшей из одного витка. Ясно, что чувствительность мультипликаторов была гораздо выше. Неприятным свойством мультипликаторов

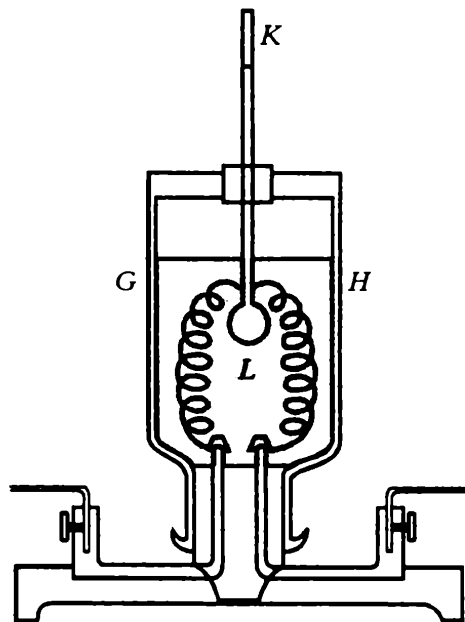


Рис. 1

было то, что магнитная стрелка около положения равновесия испытывала очень медленно затухающие колебания. Каждый отсчет занимал много времени. Ленц применил успокоитель, прикрепленный к стрелке и опущенный в вязкое масло. Это чрезвычайно ускорило измерения.

На рисунке 1 приведен чертеж, взятый из статьи Ленца и изображающий прибор для определения количества теплоты, выделяемого проводником. Здесь KL – термометр; вместо воды в сосуд GH был налит спирт. Электропроводность спирта ниже электропроводности воды, это устраняет опасность возникновения токов между витками проволоки.

Для компенсации потерь тепла во внешнюю среду Ленц применил остроумный прием. Прибор заливался спиртом, имевшим температуру более низкую, чем температура окружающего воздуха. После включения тока нагрев производился до температуры, на столько же градусов превышавшей температуру воздуха, на сколько вначале она была ниже. Тогда до выравнивания температур прибора и воздуха тепло идет от воздуха к прибору, а после выравнивая – от прибора к воздуху. Ленц показал, что таким образом потери тепла компенсируются довольно точно.

Проведя большую серию измерений, Ленц пришел к заключению, что установленные в предварительных опытах

Джоуля закономерности выполняются с высокой степенью точности. Он так сформулировал эти закономерности:

«1) Нагревание проволоки гальваническим током пропорционально сопротивлению проволоки.

2) Нагревание проволоки гальваническим током пропорционально квадрату тока, служащего для нагревания».³

Обе закономерности могут быть объединены в одной формуле Джоуля – Ленца

$$W = RI^2,$$

где W – мощность выделяемого тепла, R – сопротивление, I – сила тока.

Для единицы объема проводника можно записать

$$w = \rho j^2,$$

где ρ – удельное сопротивление, j – плотность тока. Используя закон Ома в виде $j = \frac{E}{\rho}$, можно получить

$$w = jE, \text{ или } w = \sigma E^2,$$

где E – напряженность электрического поля, $\sigma = \frac{1}{\rho}$ – проводимость.

Вывод формулы Джоуля – Ленца

При выводе закона Ома из электронных представлений нас интересует только судьба электронов. Достаточно учесть, что электроны приобретают дополнительную скорость в электрическом поле, вызывающем ток, и теряют эту скорость при столкновении с атомами. Что происходит с атомами при этих столкновениях – для вывода закона Ома не существенно. Эффект Джоуля – Ленца, наоборот, состоит в увеличении скорости теплового движения атомов за счет энергии, передаваемой электронами атомам при столкновениях.

Обычно элементарный расчет тепла Джоуля – Ленца проводится следующим образом.

Дополнительная скорость электрона равна произведению ускорения в электрическом поле eE/m на время пролета длины свободного пробега τ (интервал времени между двумя

³ Доложено в Российской Академии наук 11 августа 1843 года.

столкновениями):

$$u = \frac{e}{m} E \tau.$$

Дополнительная кинетическая энергия, соответственно, равна

$$\frac{mu^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{e^2 \tau^2}{m} E^2.$$

Каждый электрон испытывает в секунду $1/\tau$ столкновений с атомами и при каждом столкновении передает атому энергию, равную $\frac{mu^2}{2}$. В единице объема N электронов. Следовательно, в единице объема происходит N/τ столкновений в секунду, и атомам передается энергия, равная

$$W = \frac{N}{\tau} \frac{mu^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{e^2 N \tau}{m} E^2. \quad (1)$$

Это и есть мощность, выделяемая в виде тепла. Так как, в соответствии с законом Ома,

$$\frac{1}{2} \frac{e^2 N \tau}{m} = \sigma,$$

где σ – проводимость, то

$$W = \sigma E^2 = jE.$$

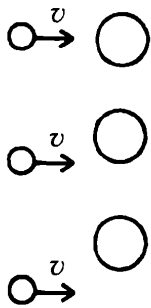
Мы получили формулу Джоуля – Ленца, исходя из электронных представлений. Все как будто в порядке. Приглядимся, однако, внимательнее к приведенному расчету.

Роль законов сохранения

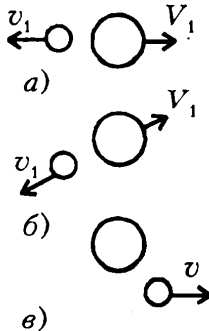
Во внешне гладком выводе формулы Джоуля – Ленца есть не очень понятное место. Почему электрон при столкновении отдает атому энергию, как раз равную дополнительной энергии, приобретенной в электрическом поле? Рассмотрим этот вопрос подробнее.

При решении любой физической задачи надо помнить о строгих законах сохранения. Согласно законам сохранения импульса и энергии, электрон при столкновении должен отдавать атому вполне определенную долю своей кинетической энергии. Неясно, почему эта доля полной кинетической

До столкновения



После столкновения



энергии должна быть как раз равна дополнительной энергии электрона, приобретенной в электрическом поле.

Будем считать, что электроны и атомы сталкиваются как упругие шарики. Подсчитаем, какую долю полной кинетической энергии должен отдать электрон атому при центральном

Рис. 2

ударе (рис.2,а). Пусть до столкновения электрон движется со скоростью v , а атом покоится. Обозначим скорость электрона после столкновения v_1 , скорость атома V_1 . Тогда по закону сохранения импульса

$$mv = mv_1 + MV_1,$$

а по закону сохранения энергии

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{MV_1^2}{2}.$$

Из этих двух уравнений получаем

$$\frac{MV_1^2}{2} = \frac{4Mm}{(m+M)^2} \frac{mv^2}{2}.$$

Так как $M \gg m$, в знаменателе можно пренебречь m по сравнению с M . Тогда

$$\frac{MV_1^2}{2} = \frac{4m}{M} \frac{mv^2}{2}.$$

При нецентральных ударах (рис.2,б) атом будет получать меньшую долю начальной энергии электрона. При пролете электрона по касательной к «поверхности» атома (рис.2,в) передаваемая энергия будет равна нулю. Средняя доля энергии определится как полусумма максимальной доли и нуля, иными словами, она равна половине максимальной доли. Итак, средняя энергия, получаемая атомами от электронов при каждом столкновении, равна

$$\frac{MV^2}{2} = \frac{2m}{M} \frac{mv^2}{2}. \quad (2)$$

Так как m/M порядка $10^{-3} - 10^{-5}$, электрон может отдать атому только ничтожную часть своей полной кинетической энергии. Это и создает своеобразную «шубу», препятствующую обмену энергией между электронами и атомами.

Из обратимости упругих столкновений во времени следует, что атом, налетающий на электрон, сможет отдать электрону только такую же малую часть своей начальной кинетической энергии. Нетрудно в этом убедиться и прямым расчетом.

Другой способ вычисления джоулева тепла

В проводнике движутся не только свободные электроны, но и атомы, совершающие хаотические колебания около своих положений равновесия. Поэтому надо рассматривать столкновения между двумя коллективами движущихся частиц.

При одних столкновениях электроны отдают часть своей энергии атомам, при других, наоборот, атомы отдают часть своей энергии электронам. Благодаря действию электрического поля электроны все время «подогреваются», получая дополнительную энергию. В результате электронный газ имеет несколько более высокую температуру T_e , чем температура атомов T_a . Поэтому, в среднем, электроны отдают атомам большую энергию, чем получают от них.

Как уже было показано, при каждом столкновении электрон может отдать $2 \frac{m}{M}$ -ю часть своей кинетической энергии. То же относится и к атомам. Воспользуемся обычным выражением средней энергии частицы через температуру. Тогда

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT_e, \quad \frac{MV^2}{2} = \frac{3}{2} kT_a.$$

Поток энергии, определяющий нагрев атомов, равен разности двух потоков энергии — потока, текущего от электронов к атомам, и потока от атомов к электронам. Ясно, что этот результирующий поток энергии должен быть пропорционален числу столкновений электронов с атомами $\frac{N}{\tau}$, коэффици-

енту передачи энергии $2 \frac{m}{M}$ и разности средних энергий электронов и атомов $\frac{3}{2} k(T_e - T_a)$. Строгий расчет показывает,

что никакого численного коэффициента в окончательное выражение для результирующего потока энергии вводить не надо, т. е.

$$W = \frac{N}{\tau} \frac{2m}{M} \frac{3}{2} k(T_e - T_a). \quad (3)$$

В этой формуле W – джоулево тепло, но здесь оно выражается иначе, чем в формуле (1).

В отсутствие внешнего электрического поля наступает равновесие между электронами и атомами – электронная температура равна температуре атомов.

При тепловом равновесии ($T_e = T_a$) результирующий поток энергии должен быть равен нулю. Действие электрического поля на электроны вызывает нарушение этого теплового равновесия.

Приравняем правые части равенств (1) и (3) (мы можем это сделать, так как они характеризуют одну и ту же величину):

$$\frac{1}{2} \frac{e^2}{m} N \tau E^2 = \frac{N}{\tau} \frac{2m}{M} \frac{3}{2} k(T_e - T_a). \quad (4)$$

Отсюда для разности электронной и атомной температур получим

$$T_e - T_a = \frac{1}{6} \frac{M}{m} \frac{e^2 \tau^2}{km} E^2. \quad (5)$$

Таким образом, в результате действия электрического поля устанавливается определенная разность температур. Мы видим, что эта разность пропорциональна отношению масс M/m . Это обстоятельство компенсирует обратное отношение масс в формуле (2) и делает законным первоначальный вывод формулы Джоуля – Ленца, в котором M/m не фигурирует вообще.

Следует отметить, что в первые моменты времени после наложения электрического поля на проводник равенство (4) не выполняется. Энергия, полученная электронами от электрического поля, некоторое время превышает энергию, отдаваемую электронами атомам. В результате происходит чрезвычайно быстрый рост T_e , что в свою очередь приводит к росту энергии, отдаваемой электронами атомам. Так будет продолжаться, очевидно, до тех пор, пока энергия, получаемая электронами от поля, и энергия, отдаваемая ими атомам, не

сравниваются. После этого электроны при столкновениях с атомами будут отдавать им энергию, равную дополнительной кинетической энергии, приобретенной в электрическом поле за время τ между двумя столкновениями. Электронная температура стабилизируется на уровне, определяемом равенством (5).

Примерно то же происходит при отоплении дома зимой. Все тепло, поступающее от отопления в комнаты, уходит сквозь стены дома на улицу. Иначе температура в комнате все время бы повышалась. Отопление необходимо для поддержания перепада температур между комнатой и улицей. Чем меньше теплопроводность стен, тем медленнее тепло уходит из комнаты и тем легче поддерживается перепад температур.

Электронный газ и атомы в проводнике представляют как бы два тела с разными температурами, но перемешанные в одном объеме, причем одно из «тел» подогревается электрическим полем. Тепло, как всегда, переходит от более горячего тела (электронов) к более холодному (атомам). Теплопроводность «стенки», разделяющей эти два «тела», определяется коэффициентом, стоящим перед разностью температур в формуле (3).

Оценим разность электронной и атомной температур для металлического проводника. Время τ порядка 10^{-14} с, E — порядка 10^{-3} В/см. Для разности температур $T_e - T_a$ получаем величину порядка 10^{-9} °С! Такая ничтожная разность температур достаточна для обеспечения нужного результирующего потока энергии, несмотря на плохой коэффициент передачи энергии при каждом столкновении между электронами и атомами. Объясняется это колоссальным числом столкновений между электронами и атомами: $\frac{N}{\tau}$ порядка 10^{36} с⁻¹.

В полупроводниках и особенно в газовой плазме дело может обстоять совсем иначе.

Неравновесная плазма

Строго говоря, классические электронные представления, использованные нами, не применимы к металлическим проводникам. Поведение электронов в таких проводниках носит сугубо квантовый характер. Классические представления справедливы в условиях прохождения электрического тока сквозь газы (газовая плазма), но в газах могут иметь место совсем другие соотношения, и законы Ома и Джоуля — Ленца

зачастую теряют силу. При прохождении электрического тока сквозь разреженный газ благодаря большой длине свободного пробега электронов время пробега τ может быть на несколько порядков больше, чем в металлах. Так же на несколько порядков возрастает и E . В результате электронная температура может достигать десятков тысяч градусов при температуре самого газа (атомов) в несколько сот градусов (например, в люминесцентных или рекламных лампах). Получается смесь двух газов с температурами, отличающимися в десятки и даже сотни раз. Ни о каком тепловом равновесии в таких условиях и речи быть не может. Такая плазма называется неравновесной. Ясно, что малость отношения m/M благоприятствует установлению большой разности температур электронов и атомов неравновесной плазмы.

В условиях электрического газового разряда низкого давления нарушается закон Ома, так как τ и N зависят от E . Из-за большой энергии электронов могут происходить не только упругие, но и неупругие столкновения электронов с атомами. При неупругих столкновениях кинетическая энергия электронов преобразуется во внутреннюю энергию атомов. Атомы возбуждаются и начинают испускать свет, этим и объясняется свечение газоразрядных ламп. Может происходить даже выбивание внутриатомных электронов (ионизация атомов), что приводит к росту N . При каждом неупругом столкновении электрон теряет гораздо большую энергию, чем при упругом. Джоулево тепло теперь составляет только часть от полной мощности тока. Иногда джоулево тепло становится даже пренебрежимо малым по сравнению с jE . Ясно, что в таких случаях формула Джоуля – Ленца неприменима и равенство (4) не выполняется.

Наконец, в некоторых сильноточных разрядных устройствах, создаваемых с целью получения управляемых термоядерных реакций, имеет место обратное соотношение температур. Температура атомов (точнее, ионов) оказывается выше электронной температуры. Результирующий поток энергии течет в обратном направлении – от атомов к электронам. В этих условиях электроны не нагревают, а охлаждают атомы.

*Что такое лазер или мазер,
На какой они возникли базе?*

Л. Мартынов

Гелий-неоновый лазер становится распространенным прибором, широко применяемым в самых различных областях техники и науки. Во многих школах появились такие лазеры, и с их помощью изучаются свойства когерентного света.

Сердцем каждого лазера служит слой так называемой активной среды, усиливающей проходящий сквозь нее световой луч. В гелий-неоновом лазере такой средой является плазма, образующаяся при прохождении электрического тока сквозь смесь гелия с неоном в газоразрядной трубке.

Обычно при прохождении через среду световой луч испытывает ослабление — часть энергии луча поглощается средой. Однако можно создать среду, при прохождении через которую свет будет не ослабляться, а усиливаться. Впервые возможность создания такой среды была указана в 1939 году. Конечно, в процессе усиления света закон сохранения энергии не нарушается. Дополнительную энергию световой луч черпает из внутренней энергии атомов среды.

Эйнштейн анализирует взаимодействие света с атомом

Переходы, переходы...

Из песни

Для того чтобы понять, как «работает» усиливающая свет среда, надо рассмотреть более подробно взаимодействие света с атомами. Первым такое рассмотрение провел создатель теории относительности Альберт Эйнштейн. Поразительно, сколько фундаментальных результатов в самых различных областях современной физики связано с именем Эйнштейна!

Опубликовано в «Кванте» №6 за 1978 год.

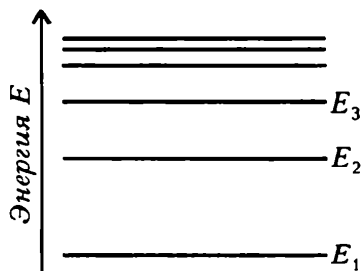


Рис. 1. Схема энергетических уровней атома

В 1961 году Эйнштейн, развивая идеи Макса Планка о квантовом характере взаимодействия света с атомами, впервые четко сформулировал существование трех элементарных оптических процессов, в которых участвуют атомы.

Как известно, согласно квантовым представлениям, внутренняя энергия атомов может изменяться только скачками. Атом, как

мы говорим, может находиться в стационарном состоянии на одном из энергетических уровней (рис. 1), соответствующих вполне определенным запасам внутренней энергии. Оптические переходы атома с одного уровня на другой сопровождаются испусканием или поглощением атомом фотонов. Согласно закону сохранения энергии, должно выполняться равенство

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (1)$$

где $h\nu$ – энергия фотона (h – постоянная Планка, ν – частота света), E_1 и E_2 – энергии стационарных состояний атома, между которыми происходит переход. Ясно, что для перехода с одного энергетического уровня на более высокий атом должен поглощать фотоны. Энергия поглощенных фотонов идет на увеличение внутренней энергии атома. Наоборот, при переходах на более низкий уровень атом должен испускать фотоны, уносящие избыток внутренней энергии атома.

Эйнштейн указал, что существует один тип процессов поглощения фотонов и два типа процессов испускания фотонов (рис. 2). В процессе поглощения атом как бы глотает подлетевший к нему фотон и переходит на более высокий энергетический уровень (рис. 2, а). Процесс испускания атомом фотона может происходить спонтанно – самопроизвольно, без всякого внешнего воздействия (рис. 2, б).

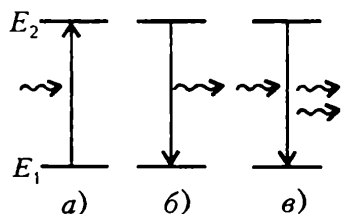


Рис. 2. Поглощение (а), спонтанное испускание (б) и вынужденное испускание (в) фотонов

Конечно, для того чтобы могло возникнуть спонтанное испускание фотона, необходимо атом предварительно возбудить. Спонтанное испускание происходит из-за неустойчивости возбужденного состояния атома. Продолжитель-

ность жизни изолированных возбужденных атомов различна для разных сортов атомов и для разных состояний.

Наиболее важным для лазеров было открытие Эйнштейном существования второго типа процессов испускания фотонов – так называемого вынужденного, или стимулированного, испускания. (Мы намеренно несколько отклонились от систематики оптических процессов, данной самим Эйнштейном. Он называл вынужденное испускание отрицательным поглощением, объединяя тем самым этот процесс с процессом поглощения. Ниже мы увидим, что для этого есть основания, но в современной литературе установилась терминология, используемая нами.)

Вынужденное испускание возникает при столкновении фотона с возбужденным атомом. Как показал Эйнштейн, вынужденный переход атома с уровня E_2 на более низкий уровень E_1 может стимулировать только фотон с энергией, удовлетворяющей равенству (1). Фотон как бы толкает и без того неустойчивый возбужденный атом, и тот «падает» на более низкий энергетический уровень, испуская новый фотон (рис.2,б). При этом фотон, стимулировавший переход, не меняет своей энергии и направления своего полета. Важно подчеркнуть, что вновь рожденный фотон является «близнецом» фотона, стимулировавшего его рождение, — он несет такую же энергию и летит по тому же направлению.

Итак, после встречи первого фотона с возбужденным атомом дальше летят уже два совершенно одинаковых фотона, а атом переходит на более низкий энергетический уровень. Абсолютная одинаковость этих двух фотонов проявляется не только в равенстве энергий и в совпадении направления их полета, но и в свойстве, называемом когерентностью. Существует квантовая теория когерентности, особенно развившаяся после появления лазеров; однако более наглядно это свойство описывается на основе классических, волновых представлений о свете.

На волновом языке процесс стимулированного испускания описывается так: световая волна, встретившая на своем пути возбужденный атом, «высасывает» из него энергию и, увеличив за счет этой энергии амплитуду, продолжает распространяться без всякого скачка фазы и изменения направления.

Теперь нам понятно, почему процесс вынужденного испускания Эйнштейн назвал отрицательным поглощением. Ведь поглощение и вынужденное испускание – это два «взаимно обратных» процесса. Начальное состояние в первом процессе

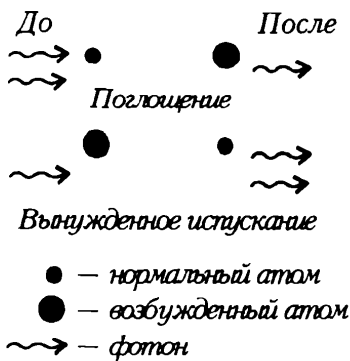


Рис.3. Два «взаимно обратных» процесса поглощения и вынужденного испускания фотонов

совпадает с конечным состоянием второго и наоборот (рис.3). Кроме того, при поглощении уменьшается интенсивность падающего света, но его когерентность не нарушается; в результате вынужденного испускания интенсивность падающего света увеличивается за счет стимулированного излучения, которое когерентно с падающим светом.

Таким образом, если в среде имеются возбужденные атомы, способные к вынужденному испусканию, то проходящий через такую среду световой поток увеличивает

свою интенсивность, оставаясь когерентным, и этот процесс прямо противоположен процессу поглощения.

Именно когерентное усиление света при вынужденном испускании лежит в основе создания оптических квантовых генераторов — лазеров. Само слово «лазер» образовано из начальных букв английских слов **light amplification by stimulated emission of radiation** (усиление света стимулированным испусканием излучения).

Инверсная населенность и как ее получают

Все вверх дном

Название английской сказки

Теперь уже можно объяснить, почему различные среды обычно ослабляют, а не усиливают свет. Все дело в том, что в обычных условиях всегда больше атомов на нижних уровнях энергии, чем на более высоких (рис.4). Поэтому в среде больше атомов, способных «глотать», а не испускать фотоны, и число актов поглощения превышает число актов вынужденного испускания.

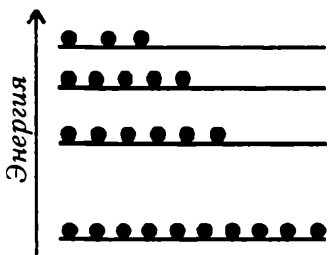


Рис.4. Нормальное распределение атомов по энергетическим уровням

Для получения усиливающей среды необходимо создать инверсию населенностей атомами энергетических уровней — создать ситуацию, когда на верхних уровнях находится больше атомов, чем на нижних

(рис.5). Тогда акты вынужденного испускания будут преобладать над актами поглощения, и за счет вынужденного испускания будет происходить усиление света. Посмотрим,

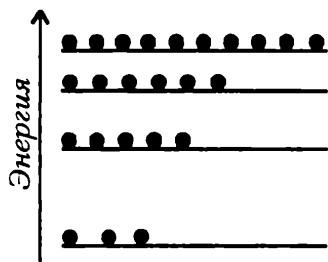


Рис.5. Инверсное распределение атомов по энергетическим уровням

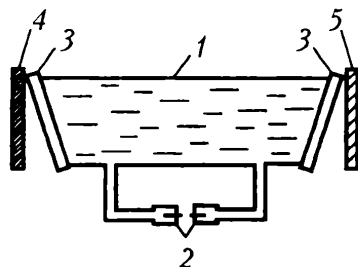


Рис.6. Схема гелий-неонового лазера: 1 – газоразрядная трубка, 2 – электроды, 3 – выходные окна, 4 – сплошное зеркало, 5 – частично прозрачное зеркало

как инверсия населенностей получается в гелий-неоновом лазере.

Конструкция гелий-неонового лазера очень проста (рис.6). Основные его элементы – газоразрядная трубка, наполненная смесью гелия и неона, и два зеркала, одно – сплошное, другое – частично прозрачное. Процессы, происходящие в лазере, далеко не так просты, как его конструкция. Попытаемся в них разобраться.

При прохождении электрического тока сквозь смесь гелия и неона в газоразрядной трубке возникает плазма, состоящая из атомов, ионов и свободных электронов. В плазме идет своеобразная «потасовка» между электронами и атомами, во время которой то атомы отнимают у электронов энергию, то, наоборот, электроны отнимают энергию у атомов.

Если электрон обладает энергией, удовлетворяющей неравенству

$$\frac{mv^2}{2} \geq E_2 - E_1, \quad (2)$$

то при столкновении с атомом он может возбудить атом, т.е. перевести его с уровня с энергией E_1 на более высокий уровень с энергией E_2 . Такие неупругие столкновения электронов с атомами называются ударами первого рода. При ударе первого рода электрон теряет всю (знак «–» в (2)) или часть (знак «>» в (2)) своей энергии, и условие (2) выражает закон сохранения энергии при этом процессе. Сказывается «кванто-

вая гордость» атома, не принимающего подачек в виде порций энергии, меньших чем $E_2 - E_1$.

Казалось бы, при помощи электронных ударов первого рода нетрудно получить инверсию населенностей. Надо только создать условия, при которых в плазме будет много быстрых электронов с энергией, удовлетворяющей условию (2). Тогда за счет ударов первого рода атомы перейдут на верхний уровень, и возникнет инверсия населенностей.

Однако надо учесть два важных обстоятельства, которые препятствуют созданию инверсной населенности. Наряду с ударами первого рода существуют удары второго рода, при которых возбужденные атомы отдают энергию электронам и переходят с верхних уровней вниз. В столкновениях второго рода могут участвовать, очевидно, электроны, обладающие любой кинетической энергией. Для таких столкновений нет ограничения (2). Поэтому в плазме всегда больше электронов, способных совершать удары второго рода, мешающие установлению инверсии населенностей, чем электронов, способных возбуждать атомы.

И еще одно обстоятельство. Несмотря на очень высокую электронную температуру в плазме (порядка десятков тысяч градусов)¹, средняя энергия электронов обычно ниже порогового значения $E_2 - E_1$. Если бы все электроны обладали одной и той же энергией, равной средней энергии \bar{E} их теплового

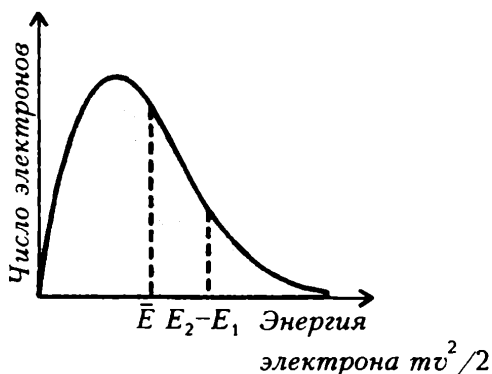


Рис. 7. Распределение электронов по энергиям

движения, то ни один из них не смог бы возбудить атом. При данной температуре (при данном значении \bar{E}) энергии $mv^2/2$ теплового движения отдельных электронов отличаются от значения $\bar{E} = mv^2/2$ — существует, как говорят, разброс электронов по энергиям. На рисунке 7 приведен график распределения элект-

¹ Электроны в плазме подогреваются электрическим полем, поддерживающим электрический ток. Из-за огромного различия в массах теплообмен между электронами и атомами затруднен. Поэтому температура электронного газа в десятки и сотни раз выше температуры газа из нейтральных атомов.

ронов по энергиям при данной температуре. Видно, что лишь малая часть электронов обладает энергией выше порога возбуждения атома.

Населенность уровня зависит не только от числа возбуждающих столкновений, но и от продолжительности жизни атома на данном энергетическом уровне. Ясно, что чем больше продолжительность жизни на данном уровне, тем больше атомов накапливается на нем. Поэтому для получения инверсии населенностей выгодно иметь верхний уровень с большей продолжительностью жизни, а нижний – с меньшей. Для лазера, работающего в непрерывном режиме, это условие является жестким.

На рисунке 8,а изображена упрощенная схема интересующих нас уровней атома неона. Переходы между уровнями E_3 и E_2 сопровождаются испусканием красной линии с длиной волны 0,6328 мкм. Продолжительность жизни атомов на уровне E_3 равна примерно $2 \cdot 10^{-7}$ с, а на уровне E_2 – 10^{-8} с, т.е. примерно в пять раз меньше, что благоприятствует получению инверсии. Однако до уровня E_3 атомы могут возбуждаться только электронами с энергиями, превышающими $E_3 - E_1$, а до нижнего уровня E_2 – электронами с

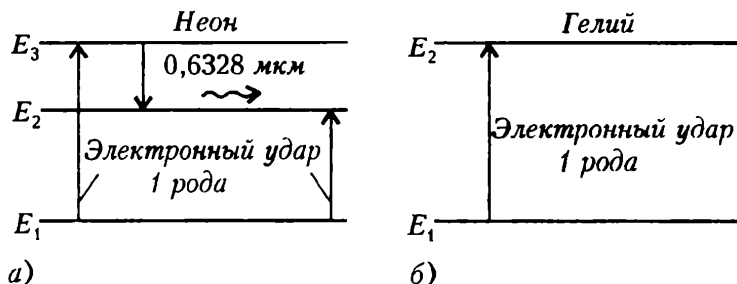


Рис.8. Уровни энергии в атомах неона и гелия

энергиями, превышающими $E_2 - E_1$.² Так как $E_3 - E_1 > E_2 - E_1$, данная ситуация не благоприятствует инверсии. Чем выше уровень, тем труднее электронам возбуждать атомы

² Возможна и такая ситуация: атом, столкнувшийся с электроном и перешедший на возбужденный уровень, успевает за время жизни столкнуться со вторым электроном и перейти на более высокий уровень (такое возбуждение называется ступенчатым). Однако концентрация возбужденных атомов мала (из-за очень малой продолжительности жизни атомов в возбужденном состоянии), и поэтому при обычных условиях вероятность такого события ничтожна.

до этого уровня. В результате игры этих двух факторов очень трудно получить инверсию в чистом неоне. Это и заставляет применять смесь гелия с неоном, причем гелия в этой смеси примерно в десять раз больше неона.

Роль гелия весьма своеобразна. Гелий действует как бы за сценой, но при этом играет весьма важную роль в получении инверсии населенностей атомов неона. На рисунке 8,6 изображены два уровня атома гелия: самый низкий E_1 и уровень E_2 , соответствующий возбужденному состоянию с колоссальным временем жизни (конечно, в атомных масштабах) порядка 10^{-3} с. Такие уровни называют метастабильными. Очень важно, что уровень гелия E_2 находится почти на той же высоте, что и уровень E_3 неона. В гелий-неоновой смеси за счет электронных ударов первого рода накапливается большое число метастабильных атомов гелия (сказывается их огромное время жизни). Метастабильные атомы гелия сталкиваются с нормальными (невозбужденными) атомами неона и отдают им свою энергию, переходя без излучения на уровень E_1 и переводя атомы неона на уровень E_3 . Упрощенно схему этих переходов можно представить так, как на рисунке 9. Передача энергии происходит очень эффективно благодаря близости «по высоте» соответствующих уровней

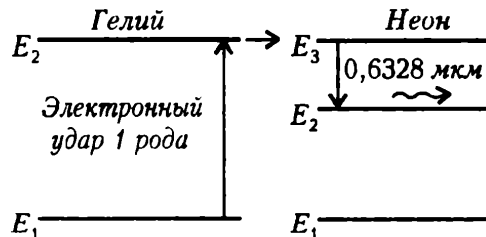


Рис. 9. «Взаимодействие» атомов гелия и неона

гелия и неона (такие явления называют квантовым резонансом). Таким образом происходит избирательное возбуждение атомов неона до уровня E_3 и возникает инверсия населенностей на уровнях E_3 и E_2 . Этот изящный метод получения инверсии надежно работает в гелий-неоновом лазере.

Интересно отметить, что для создания первых квантовых генераторов – мазеров (генераторов микроволнового излучения) советские физики Н.Г.Басов и А.М.Прохоров и американский физик Ч.Таунс использовали способ получения инверсии, как бы обратный описанному выше и заключающийся не в избирательном возбуждении до верхнего уровня, а в

избирательном удалении молекул, находящихся на нижнем уровне. Такой же прием предлагался для лазеров, но не получил пока широкого применения.

Нарастание фотонной лавины

*Отселе я вижу потоков рожденье
И первое грозных обвалов движенье.*

А.С.Пушкин

Как же происходит усиление света в гелий-неоновом лазере?

Представим себе, что какой-либо из возбужденных до уровня E_3 атомов неона спонтанно испустил фотон, летящий параллельно оси разрядной трубки и соответствующий красной линии неона. Когда этот фотон встретит на своем пути возбужденный атом неона, произойдет акт вынужденного испускания, и дальше уже полетят два фотона-близнеца. Каждый из этих фотонов, встретив возбужденный атом неона, стимулирует рождение нового фотона. Дальше будут лететь уже четыре фотона и так далее. В результате нарастает лавина одинаковых фотонов, летящих в одном и том же направлении (рис.10). На волновом языке это означает усиление световой волны, причем, напомним, — усиление когерентное.

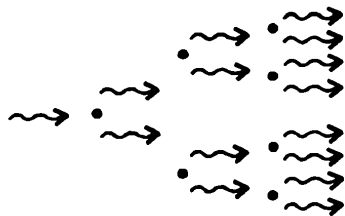


Рис. 10. Нарастание фотонной лавины

Образовавшаяся лавина фотонов натывается на одно из зеркал лазера и, отразившись, идет обратно сквозь активную среду, что сопровождается нарастанием лавины. Затем происходит отражение от второго зеркала и опять нарастание лавины и так далее. Мы с помощью зеркал как бы удлиняем активную среду. Однако не следует думать, что даже при идеальных зеркалах, отражающих все падающие на них фотоны, лавина будет безгранично нарастать. Лавина сама себе портит условия нарастания. При достаточно высокой плотности потока фотонов они настолько быстро будут «сбивать» возбужденные атомы на более низкий энергетический уровень, что исчезнет инверсия населенностей. А ведь наряду с вынужденным испусканием происходят процессы поглощения и спонтанного излучения. В процессе спонтанного излучения рождающиеся фотоны распростра-

няются в пространстве равномерно по всем направлениям, и их вклад в фотонную лавину очень мал и представляет собой некогерентный свет. Спонтанное излучение атомов создает в лазере небольшой так называемый «шум». Когда в результате исчезновения инверсии населенностей наступит равновесие между числом актов поглощения и числом актов спонтанного и вынужденного испускания, дальнейшее усиление света прекратится. (Согласно закону сохранения энергии, при этом мощность, выделяемая в процессах испускания, станет равна мощности, подводимой для возбуждения атомов Ne.)

От усиления к генерации

*Точное определение «обратной связи»
не имеет никакой важности.*

У.Р.Эшби. Введение в кибернетику

Теперь выясним роль реальных зеркал с коэффициентом отражения меньше единицы. Без зеркал газоразрядная трубка с гелий-неоновой смесью работала бы как усилитель света. Зеркала превращают прибор в генератор света. Применяя радиотехническую терминологию, можно сказать, что зеркала обеспечивают положительную обратную связь.

Когда описанная выше световая волна достигнет одного из зеркал, она частично отразится, пойдет в обратном направлении сквозь активную среду, опять усиливаясь, и достигнет второго зеркала. Где повторится все то же. Волна будет «метаться» между зеркалами, как тигр в клетке.

Напомним, что одно из зеркал чуть-чуть прозрачное. При каждом отражении от этого зеркала наружу выйдет небольшая часть световой волны. Луч лазера представляет сумму этих частей световой волны, мечущейся в зеркальной клетке. И если потери света в зеркалах (а зеркал без потерь не бывает) будут компенсироваться усилением света в активной среде, установится стационарный режим генерации. Активная среда гелий-неонового лазера обладает очень слабым усиливающим действием (интенсивность светового потока увеличивается примерно на 10% на одном метре пути в активной среде). Поэтому зеркала в таком лазере должны иметь очень высокие коэффициенты отражения, превышающие 90%.

Итак, мы разобрались в том, какие явления происходят в газоразрядной трубке гелий-неонового лазера. По существу,

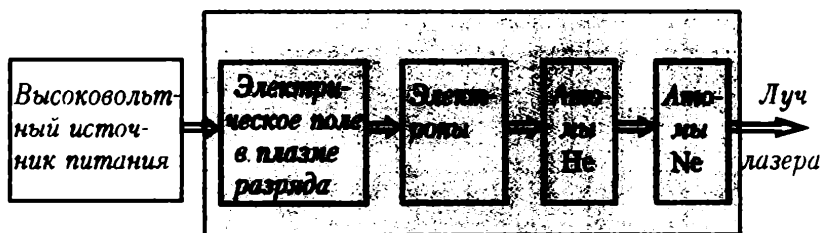


Рис. 11. Преобразование энергии в гелий-неоновом лазере

в лазере происходит процесс преобразования энергии. Основные этапы этого процесса можно представить схемой, приведенной на рисунке 11.

Луч лазера

Молниевидный брызнет луч.

Ф. Тютчев

Свечение активной среды принципиально отличается от свечения таких источников света, как лампа накаливания или люминесцентная лампа. В обычных источниках света царит полный хаос – то здесь, то там возникают отдельные световые вспышки, сливающиеся в общее свечение. Эти световые вспышки представляют собой отдельные группы волн, испускаемых различными источниками (различными возбужденными атомами), и начальные фазы этих волн совершенно случайны, никоим образом не согласованы. Свечение обычных источников света напоминает гул неорганизованной, чем-то возбужденной толпы. Совсем иная картина в лазере. Благодаря актам вынужденного испускания световая волна упорядочивает излучение отдельных атомов. Здесь все напоминает стройный хор – сначала вступают одни хористы, затем другие, сила звучания нарастает. Дирижирует хором сама порождаемая им световая волна. Фазы отдельных групп волн, испускаемых различными атомами, согласованы между собой. Вот это и приводит к когерентности излучаемого лазером света.

Итак, луч лазера представляет собой сумму частей световой волны, выходящих через полупрозрачное зеркало. А так как все эти части когерентны между собой, то в результате их сложения происходит интерференция. Как известно, максимальная амплитуда результирующей волны получится, если разности хода складываемых волн равны целому числу длин волн. Длина пути, проходимого волной лазера между двумя

отражениями от одного и того же зеркала, равна $2L$, где L – расстояние между зеркалами. Следовательно, для получения яркого выходящего луча должно выполняться условие

$$2L = n\lambda, \quad (3)$$

где n – целое число, λ – длина световой волны. Это условие имеет простой смысл: на длине лазерной трубки (резонатора) должно укладываться целое число полуволн. При колебаниях струны с закрепленными концами на длине струны также укладывается целое число полуволн. Это – условие установления стоячих волн. И внутри лазера устанавливается стоячая световая волна (точнее, почти стоячая – из-за прозрачности одного из зеркал).

Условие (3) можно переписать в таком виде:

$$\nu = n \frac{c}{2L}, \quad (4)$$

где c – скорость света, $\nu = \frac{c}{\lambda}$ – частота. Но частота света, излучаемого атомами неона при переходе с уровня E_3 на уровень E_2 , равна

$$\nu = \frac{E_3 - E_2}{h}. \quad (5)$$

Следовательно, частота света, генерируемого лазером, должна одновременно удовлетворять и уравнению (4), и уравнению (5). Первое уравнение определяет условие резонанса между светом и резонатором и носит классический характер. Поскольку зеркальный резонатор имеет макроскопические размеры, свет взаимодействует с ним как световая волна. Уравнение (5) имеет квантовый характер и определяет условие резонанса между светом и атомами активной среды, представляющими квантовые микрорезонаторы. Свет взаимодействует с квантовыми микрорезонаторами как поток фотонов.

Таким образом, в лазере одновременно проявляются и волновые, и квантовые свойства света.

Посмотрим теперь, что практически означает соблюдение условий (4) и (5).

Если бы атом взаимодействовал только с излучением, обладающим строго определенной частотой ν_0 (рис.12,*а*), мы должны были бы подобрать размер резонатора – расстояние L между зеркалами – таким, чтобы собственная частота резонатора (определяемая усло-

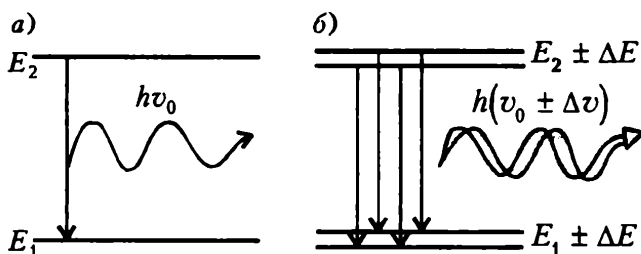


Рис.12. Возникновение интервала значений энергии атома

вием образования стоячих волн) была как раз равна частоте ν_0 . И поддерживать это расстояние надо было бы с точностью до малых долей длины волны излучения. Практически удовлетворить этому требованию очень трудно. К счастью, эта задача облегчается тем, что на самом деле частота излучения атома не в точности равна ν_0 , а лежит в некотором интервале значений $\nu_0 \pm \Delta\nu$. Одной из причин, по которым это происходит, является тепловое движение атомов. Поскольку скорости отдельных атомов могут быть больше или меньше средней скорости теплового движения, энергия атомов на данном энергетическом уровне не в точности равна E_n , а лежит в некотором интервале значений $E_n \pm \Delta E$ (рис.12,б). В интервал частот $(\nu - \Delta\nu)$, $(\nu + \Delta\nu)$ попадают несколько значений собственных частот резонатора (рис.13). Поэтому для данной частоты излучения мощный луч лазера получается при настройке резонатора на некоторый набор частот (соответствующих различным значениям целых чисел n в условии (4)). Если не принять специальных мер, гелий-неоновый лазер излучает весь этот набор частот, правда, сосредоточенный в довольно узкой области (ширина спектральной линии атома неона).

Есть и одночастотные лазеры, но в них имеется специальное устройство, выделяющее один из узких резонансов.

Мощность луча гелий-неонового лазера невелика — порядка одной десятой ватта. Несмотря на это, попадание луча в глаз может повредить зрение. Разрядная трубка лазера потребляет для возбуждения активной среды мощность от 20 до 100 Вт. Таким образом, гелий-неоновый лазер преобразует электроэнергию в энергию светового луча с КПД не выше долей процента.

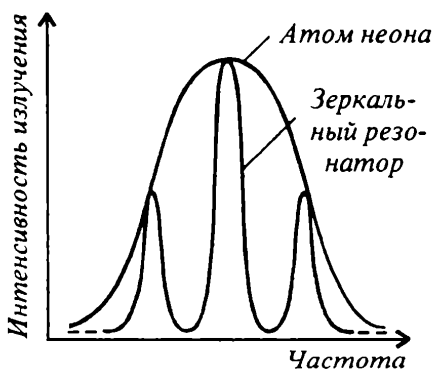


Рис.13. «Острота настройки» атомов неона и зеркального резонатора

Вместе с тем луч лазера обладает рядом весьма ценных свойств, с лихвой компенсирующих низкий КПД. Прежде всего – это направленность луча. Когда мы рассказывали о зарождении фотонной лавины, мы указывали на то, что первый фотон должен вылетать параллельно оси разрядной трубки. «Косо» вылетающий фотон и порожденные им фотоны быстро уйдут в «аут» через боковую стенку трубки, не испытав значительного усиления. Отражение от зеркал только усугубит эффект. Так что внутри трубки сохраняется направленный луч, угловая расходимость которого всего порядка 10^{-3} радиана. Острая направленность луча гелий-неонового лазера делает его незаменимым для точного установления направлений при строительстве различных сооружений и при прокладке туннелей. Высокая монохроматичность излучения гелий-неонового лазера, даже не одночастотного, делает этот лазер весьма удобным источником для изучения и практического применения различных интерференционных явлений.

Кроме гелий-неонового лазера, есть большое число других типов газовых лазеров, использующих в качестве активных сред различные атомарные и молекулярные газы. Среди них есть и весьма мощные лазеры, и с довольно высоким КПД. Но это, как говорится, уже другая история.

Какого цвета зеленое стекло?

Этот вопрос может вызвать чувство естественного недоумения. Читатель с раздражением скажет: зеленое стекло потому и называется зеленым, что оно... Однако не надо спешить со снисходительными разъяснениями. Нехитрый опыт покажет вам, что вопрос о цвете зеленого стекла совсем не так прост.

Если у вас есть кусок зеленого стекла, разбейте его осторожно на несколько не очень маленьких кусочков. Затем посмотрите сквозь один из них на нить лампы накаливания. Как вы и ожидали, нить будет казаться зеленой. Наложите на этот кусочек стекла второй и снова посмотрите на нить. Вероятно, вы не заметите изменения цвета нити, она будет зеленой по-прежнему. Но если наложить на два кусочка стекла третий и посмотреть сквозь все три кусочка на нить, вы увидите ее уже неокрашенной – белесоватого цвета. Сквозь четыре кусочка нить будет казаться красноватой, а сквозь пять кусочков – рубиново-красной!

Результат совершенно неожиданный и весьма поучительный. Оказывается, цвет стекла зависит от его толщины, и зеленое в тонком слое стекло становится красным при достаточно большой толщине слоя. Таким свойством обладает, конечно, не каждое зеленое стекло, но как раз самые распространенные дешевые сорта зеленых стекол.

Любопытно, что это же свойство присуще раствору самого важного красящего вещества на земле – хлорофилла. Как известно, хлорофилл окрашивает листья растений в зеленый цвет. Поместив листья в спирт, можно получить раствор хлорофилла в спирте и провести такой опыт. Поставьте на лист белой бумаги стакан и медленно наливайте в него раствор хлорофилла. Сначала дно стакана на просвет будет казаться зеленым, а затем, при большой толщине слоя, раствор приобретет насыщенный темно-красный цвет.

Опубликовано в «Кванте» №7 за 1978 год.

Вернемся к зеленому стеклу. Можно еще сильнее запутать вопрос о цвете стекла, если после лампочки накаливания посмотреть сквозь кусочки стекла на раскаленный конец кочерги. Уже через три кусочка стекла он будет казаться рубиново-красным. Вот вам и второй неожиданный результат: видимый цвет стекла зависит не только от его толщины, но и от того, на какой светящийся предмет мы смотрим сквозь это стекло. Слой из трех кусочков стекла кажется бесцветным при наблюдении нити лампы накаливания и красным – при наблюдении конца раскаленной кочерги.

С кочергой можно сделать еще один опыт, из которого следует практически важный вывод. Вынутая из печки кочерга быстро остывает. Попробуйте проследить сквозь стекло за концом кочерги во время остывания. Как мы уже говорили, конец раскаленной кочерги виден красным сквозь три кусочка стекла. Конец несколько остывшей кочерги кажется красным уже через два кусочка. Подождав еще немного, вы увидите конец кочерги красным даже через один кусочек зеленого стекла. Из этого опыта следует, что чем выше температура раскаленного тела, тем толще должен быть слой стекла, чтобы произошло изменение его цвета. Значит, по толщине слоя стекла, необходимого для изменения цвета, можно судить о температуре раскаленного тела.

Опыты с кочергой делают понятным устройство чрезвычайно остроумного и простого прибора, служащего для определения температур раскаленных тел, – пирометрического клина. Он представляет собой действительно клин из зеленого стекла, толщина которого плавно возрастает от одного конца к другому. Клин движется в металлической оправке с отверстием для наблюдения раскаленного тела. По краю клина нанесена шкала температур, причем температура растет от тонкого конца клина к толстому. Наставив отверстие оправки на раскаленное тело, надо двигать клин в оправке до тех пор, пока не произойдет изменение видимого цвета тела. Тогда на шкале против указателя, соединенного с оправкой, можно прочесть температуру раскаленного тела. Пирометрическим клином особенно часто пользуются для определения температуры расплавленного металла, например в мартеновских печах. Несмотря на свое простое устройство, клин в опытных руках дает высокую точность.

Вы познакомились с принципом действия полезного прибора, использующего свойства зеленого стекла, но загадка самого стекла осталась загадкой.

Опыт, не сделанный Ньютоном, и ландшафтная живопись

Наверное, многие из вас помнят знаменитый опыт Ньютона с разложением солнечного луча в разноцветный спектр при помощи стеклянной призмы. Этот опыт показал, что солнечный свет представляет смесь лучей различных цветов: красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего и фиолетового. Ньютон почему-то не попытался несколько усложнить этот опыт: поставить на пути солнечного луча цветное стекло или сосуд с окрашенной жидкостью. Во всяком случае, в своих трудах Ньютон не описывает такого опыта.

Опыт с красным стеклом, собственно, ничего интересного и не дал бы. Вместо разноцветной полоски спектра остался бы только участок, соответствующий красным лучам. Результат можно было предсказать заранее: красное стекло потому и красное, что пропускает только красные лучи и поглощает все остальные.

Гораздо более интересен опыт с зеленым стеклом или сосудом, наполненным раствором хлорофилла. В этих случаях от спектра останутся уже не одна, а две полоски: зеленая и темно-красная. А это значит, что зеленое стекло и раствор хлорофилла пропускают не только зеленые, но и красные лучи.

По поводу хлорофилла очень интересны замечания знаменитого русского ботаника К.А.Тимирязева: «Убедиться в том, что хлорофилл пропускает красные лучи, можно очень легко: стоит на залитый ярким солнечным светом ландшафт посмотреть через особое синее стекло, которое пропускает красные и синие лучи, но задерживает зеленые, для того чтобы перед нашими изумленными взорами вся природа совершенно преобразилась – под обычным синим небом мы увидим кроваво-красную растительность. Не в этой ли особенности цвета хлорофилла лежат те трудности, с которыми, очевидно, приходится бороться ландшафтной живописи? На палитре живописца, по-видимому, нет тех зеленых тонов, которые представляет вблизи ярко освещенная зелень».

Оставим, однако, живопись пока в стороне и вернемся к пирометрическому клину. Несколько видоизменим описанный выше опыт. В качестве источника света используем нить лампы накаливания и между ней и призмой поместим пирометрический клин. На стене мы опять увидим две полоски – зеленую и красную, причем соотношение яркостей этих

полосок будет зависеть от толщины клина в месте прохождения светового луча. Если луч проходит сквозь тонкую часть клина, зеленая полоска значительно ярче, чем красная. При увеличении толщины клина яркость обеих полосок снижается и, начиная с некоторого момента, красная полоска становится ярче зеленой. Когда зеленая полоска ярче красной, нить видна зеленой, при обратном соотношении яркостей полосок – красной. При равенстве яркостей полосок нить кажется бесцветной.

Как будто загадка зеленого стекла разъяснена. Однако остается еще объяснить, почему с ростом толщины стекла соотношение яркостей красной и зеленой полосок меняется на обратное. Оказывается, объяснение вытекает из важного закона оптики, открытого одним бравым моряком лет двести тому назад.

Капитан дальнего плавания и геометрическая прогрессия

Капитан дальнего плавания француз Пьер Бугер, живший в первой половине восемнадцатого столетия, не был, пожалуй, простым моряком. Им написаны объемистые трактаты по конструкции судов, по навигации и другим отраслям морского дела. Французская Академия наук присудила Бугеру три премии за работы по морскому делу и избрала его своим членом. Вкус к морской науке Бугер унаследовал от своего отца, профессора гидрологии.

Если морем Бугер занимался по наследству, то оптикой он занялся по собственному почину. Бугер первый обратил внимание на проблемы, связанные с изменениями силы света и освещенности. Он придумал первые приборы для измерения силы света и установил, что сила света Солнца в 300 тысяч раз больше силы света Луны, а в его «Оптическом трактате» содержался очень важный закон ослабления света в поглощающих телах.

Чтобы понять смысл этого закона (его часто называют законом Бугера), воспользуемся не очень правдоподобной, но наглядной аналогией из области спорта. Представим себе, что мы присутствуем на плохо подготовленном массовом состязании в беге на семь километров. Слабая тренировка участников стала сказываться сразу, и болельщики быстро установили следующий любопытный закон – лишь одна треть бегунов, начавших данный километр дистанции, добегают его до конца.

Старт приняли 2187 участников, к концу первого километра на дистанции остались 729, к концу второго – 243, к концу третьего – 81, четвертого – 27, пятого – 9, шестого – 3. Наконец, седьмой километр заканчивает только один бегун, объявленный победителем. Судьям даже не пришлось воспользоваться секундомером для определения того, кто первым коснулся финишной ленточки.

Выпишем в строку числа бегунов, пробежавших различные дистанции:

2187, 729, 243, 81, 27, 9, 3, 1.

Нетрудно видеть, что эти числа образуют убывающую геометрическую прогрессию, в которой каждое последующее число в три раза меньше предыдущего, стоящего слева от него.

Вернемся от спорта к оптике. Возьмем кусок окрашенного стекла. Допустим, что он пропускает одну треть падающего на него света. Добавим второй такой же кусок. Он пропустит одну треть светового потока, прошедшего через первый кусок, т. е. одну девятую часть светового потока, падающего на первый кусок. Поставив еще один кусок, получим одну двадцать седьмую часть и т.д. Ясно, что такой же результат получился бы просто при увеличении толщины куска стекла вдвое, второе и т.д. Когда толщина стекла растет, доля пропускаемого света падает по геометрической прогрессии.

Это и есть закон, открытый Бугером. В примере с бегунами мы уже видели, как быстро уменьшаются числа в геометрической прогрессии.

Еще немного спорта

Вооруженные законом Бугера, мы можем смело броситься в атаку на загадку зеленого стекла. Однако прежде вспомним опять о спорте и представим себе такую ситуацию.

Новички, так неудачно пробежавшие дистанцию в семь километров, самоуверенно вызвали на соревнование команду опытных мастеров. Мастера приняли вызов и даже предложили весьма великодушные условия: на старт выходят все 2187 новичков и только 512 мастеров; победившей считается команда, в которой большее число бегунов добежит до конца седьмого километра.

На состязание обе команды явились в цветных майках: новички надели зеленые майки, мастера – красные. После

первого километра сторонники новичков приободрились. Из команды новичков осталось, как и в прошлый раз, 729 бегунов, а у мастеров – 256. Большой численный перевес сохранился на стороне новичков. Поклонники мастеров были несколько обескуражены тем, что в этой команде сразу вышли из строя половина бегунов. Но один из болельщиков, сделав карандашом нехитрые выкладки на папиросной коробке, уверенно заявил, что если дело пойдет так же и дальше, то выиграют наверняка мастера.

После второго километра «зеленых» осталось 243 человека, а «красных» – 128. После третьего километра «зеленых» – 81, а «красных» – 64. Настроение сторонников новичков заметно стало падать. После четвертого километра «зеленых» – 27, а «красных» – 32. Все с почтением посмотрели на предсказателя с коробкой папирос. Оставшиеся три километра только усугубили поражение «зеленых». После пятого километра «зеленых» – 9, «красных» – 16, после шестого – 3 и 8. Наконец, к финишу в конце седьмого километра пришли один «зеленый» и четыре «красных».

Выпишем друг под другом числа бегунов в обеих командах:

2187,	729,	243,	81,	27,	9,	3,	1
512,	256,	128,	64,	32,	16,	8,	4.

Во второй строке отношение последующего числа к предыдущему равно одной второй, а в первой строке, как и раньше, – одной трети. Оказалось, что эта небольшая разница в числах не только была достаточна, чтобы компенсировать большой начальный численный перевес команды «зеленых», но и привела команду «красных» к победе. Нужна была только достаточно длинная дистанция, не менее четырех километров. На более коротких дистанциях победили бы «зеленые».

В поведении зеленых и красных лучей и «зеленых» и «красных» бегунов существует полная аналогия. Зеленое стекло лучше пропускает темно-красные лучи, чем зеленые, причем, согласно закону Бугера, различие в пропускании этих лучей быстро растет с ростом толщины слоя стекла («длинная дистанция»).

Но тогда естественно возникает вопрос: почему в тонком слое стекло кажется зеленым, если оно пропускает темно-красные лучи лучше, чем зеленые? Объясняется это спектральной характеристикой источника света, с которым про-

водился опыт: зеленый участок спектра гораздо ярче, чем темно-красный (команда «зеленых» многочисленнее «красных»). В тонком слое стекла («короткая дистанция») разница в поглощении темно-красных и зеленых лучей еще не настолько велика, чтобы перекрыть перевес в начальной яркости зеленых лучей. Основную роль играют зеленые лучи, что и дает соответствующую окраску. С ростом толщины стекла, согласно закону Бугера, пропускание зеленых лучей падает несравненно быстрее, чем темно-красных (числа «зеленых» и «красных» бегунов на больших дистанциях). При достаточно большой толщине разница в пропускании уже так велика, что перекрывает начальный перевес в яркости зеленых лучей, и от всего спектра практически остается только темно-красная полоска.

Осталось только объяснить, какую роль играет температура раскаленного тела, на которое мы смотрим сквозь стекло. Известно, что чем сильнее мы раскалим любой металлический предмет, тем белее даваемый им свет. Недаром говорят: «довести до белого каления». Так, при недостаточном накале лампочка накаливания дает красноватый свет, при нормальном накале – гораздо более белый. Объясняется это тем, что с ростом температуры яркость зеленых и синих лучей растет гораздо быстрее, чем красных. Значит, при более высокой температуре разница в яркостях зеленой и темно-красной частей спектра больше, и ее труднее перекрыть поглощением в стекле. Вот почему при более высоких температурах раскаленного тела для изменения цвета наблюдаемого излучения нужно более толстое стекло.

Древнерусские иконы и наблюдения Леонардо да Винчи

На некоторых древнерусских иконах бросается в глаза необычная расцветка одеяний святых. Складки изображены краской, обладающей резко отличным цветом от цвета гладких частей одеяния. Например — красные складки на зеленом плаще или оранжевые складки на синем одеянии. Острый глаз древнерусского богомаза заметил, что некоторые ткани обладают двухцветностью и в складках приобретают другой цвет, чем на ровной поверхности. Причина двухцветности тканей та же, что и в опыте с пирометрическим клином.

Если луч света, отраженный от двухцветной ткани, пропустить сквозь призму, то в спектре обязательно останутся

две цветные полосы. Для зеленой двухцветной ткани картина будет той же, что с зеленым стеклом: останутся красная и зеленая полосы, остальные лучи поглотятся. Двухцветная зеленая ткань лучше отражает красные лучи, чем зеленые, но при однократном отражении от гладкой поверхности ткани сказывается большая яркость зеленых лучей в падающем свете. Поэтому в однократно отраженном свете все-таки преобладают зеленые лучи. В складках ткани свет испытывает по крайней мере два последовательных отражения. При втором отражении красные лучи отражаются опять сильнее, чем зеленые, и в результате двукратного отражения происходит то же, что и в зеленом стекле большой толщины: яркость красных лучей становится больше яркости зеленых лучей и ткань меняет цвет. Многократные отражения усиливают этот эффект.

Большинство обычных тканей обладает прямо противоположными свойствами. В складках получается более насыщенный, но такой же цветовой тон, что и на ровной поверхности. Объясняется это опять-таки повторными отражениями. Свет, отраженный от таких тканей, после разложения призмой дает только одну полосу в спектре вместо двух полосок у двухцветных тканей. Например, свет, однажды отраженный от желтого бархата, дает в спектре широкую полосу с наибольшей яркостью в желтой части. Кроме желтых лучей, в спектре присутствуют еще зеленые и голубые лучи. При двукратном отражении полоса в спектре становится уже, так как голубые лучи практически исчезают совсем, а зеленые сильно ослабляются. Это работает все тот же закон геометрической прогрессии. В результате желто-оранжевый отраженный свет делается более насыщенным.

Один из наиболее разносторонних гениев, живших когда-либо, — Леонардо да Винчи — не только заметил своим глазом художника эту особенность складок тканей, но и как ученый дал вполне правильное объяснение наблюдаемому явлению. В «Трактате о живописи» он пишет: «Отраженные цвета имеют гораздо большую красоту, чем природный цвет этих тел, как это видно на открывающихся складках золотых тканей... когда одна поверхность отражается от другой, стоящей напротив, а эта в ней, и так последовательно до бесконечности».

В том же «Трактате о живописи» сказано: «Рефлекс (отражения) от живого тела, получающего свет от другого

живого тела, более красны и более превосходно телесного цвета, чем любая другая часть живого тела, какая только может быть у человека». Созерцая с наслаждением в залах художественных музеев изумительные полотна Ван Дейка и Рубенса, нетрудно заметить, что и для этих великих мастеров эффект многократных отражений не был тайной.

*Масса сведений – числа законы,
2πR, H₂SO₄,
Лампа, яблоко, кружки, ньютонны,
Водород, колебания в эфире.*

Ю.Тувим

Известный рассказ о том, что к открытию закона всемирного тяготения Ньютона привело зрелище падающего с дерева яблока, имеет любопытную историю.

С.И.Вавилов в превосходной биографии Ньютона пишет, что рассказ этот, по-видимому, достоверен и не является легендой. Он ссылается на свидетельство Стаклея, близкого знакомого Ньютона:

«После обеда (в Лондоне, у Ньютона) погода была жаркая; мы перешли в сад и пили чай под тенью нескольких яблонь; были только мы вдвоем. Между прочим, сэр Исаак сказал мне, что точно в такой же обстановке он находился, когда впервые ему пришла в голову мысль о тяготении. Она была вызвана падением яблока, когда он сидел, погружившись в думы. Почему яблоко всегда падает отвесно, подумал он, почему не в сторону, а всегда к центру Земли. Должна существовать притягательная сила в материи, сосредоточенная в центре Земли. Если материя так тянет другую материю, то



Опубликовано в «Кванте» № 1
за 1979 год.

должна существовать пропорциональность ее количеству. Поэтому яблоко притягивает Землю так же, как Земля яблоко. Должна, следовательно, существовать сила, подобная той, которую мы называем тяжестью, простирающаяся по всей вселенной».

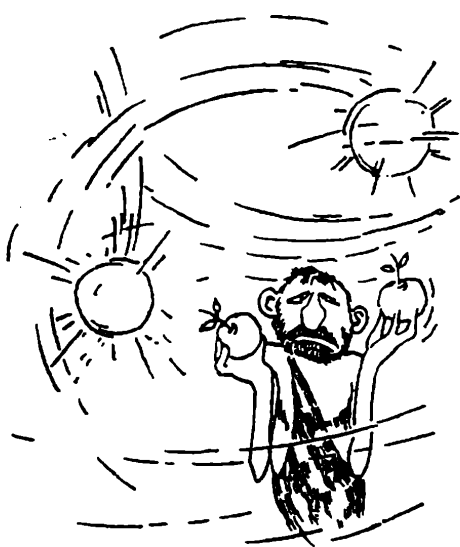
Очевидно, эти размышления о тяготении относятся к 1665 или к 1666 году, когда из-за вспышки чумы в Лондоне Ньютон вынужден был жить в деревне. В бумагах Ньютона была найде-

на такая запись по поводу «чумных лет»: «...в это время я был в расцвете моих изобретательских сил и думал о математике и философии больше, чем когда-либо после».

Свидетельство Стаклея было мало кому известно (мемуары Стаклея были напечатаны только в 1936 году), но знаменитый французский писатель Вольтер в книге, изданной в 1738 году и посвященной первому популярному изложению идей Ньютона, привел тот же рассказ со ссылкой на племянницу Ньютона. Рассказ быстро стал популярен, однако у многих вызвал сомнения. Считалось, что это очередная выдумка Вольтера, слывшего одним из самых остроумных людей своего времени. Нашлись люди, у которых этот рассказ вызвал даже возмущение. К числу последних принадлежал великий математик Гаусс. Он говорил:

«История с яблоком слишком проста; упало ли яблоко или нет — это все равно; но не понимаю, как можно предполагать, что этот случай мог ускорить или замедлить такое открытие. Вероятно, дело было так: однажды к Ньютону пришел глупый и нахальный человек и спрашивал его, каким образом он мог прийти до такого великого открытия. Ньютон, увидев, какого рода существо стоит перед ним, и желая от него отвязаться, отвечал, что ему упало на нос яблоко, и это совершенно удовлетворило любознательность того господина».

Великий русский педагог К.Д.Ушинский, наоборот, увидел в истории с яблоком глубокий смысл. Противопоставляя Ньютона так называемым светским людям, он писал:



«Нужен был гений Ньютона, чтобы вдруг удивиться тому, что яблоко упало на землю. Таким «пошlostям» не удивляются всезнающие люди света. Они даже считают удивления таким обыденным событиям признаком мелкого, детского, не сформированного еще практического ума, хоть в то же самое время сами часто удивляются уже действительным пошlostям».

Ту же мысль в поэтической форме выразил современный поэт Кайсын Кулиев в мудром стихотворении «Жить удивляясь»:

«Рождаются великие творенья
Не потому ли, что порою где-то
Обычным удивляются явлениям
Ученые, художники, поэты».

Приведем еще несколько примеров того, как история с яблоком отразилась в художественной литературе.

Соотечественник Ньютона великий английский поэт Байрон начинает десятую песнь поэмы «Дон Жуан» следующими двумя строфами¹:

«Случилось яблоку, упавши, прервать
Глубокие Ньютона размышленья,
И говорят (не стану отвечать
За мудрецов догадки и ученья),
Нашел он в этом способ доказать
Весьма наглядно силу тяготенья.
С паденьем, стало быть, и яблоком
лишь он
Был в силах справиться с Адамовых времен.

* * *

От яблок пали мы, но этот плод
Возвысил снова род людской убогий
(Коль верен приведенный эпизод).
Проложенная Ньютоном дорога
Страданий облегчила тяжкий гнет;
С тех пор открытий сделано уж много,
И, верно, мы к луне когда-нибудь,
Благодаря парам², направим путь».

¹ Перевод И. Козлова.

² В оригинале «паровой машине»

В.Солоухин в стихотворении «Яблоко» несколько неожиданно повернул ту же тему:

«Я убежден, что Исаак Ньютон
То яблоко, которое открыло
Ему закон земного тяготенья,
Что он его,
В конечном счете, – съел».

Наконец, Марк Твен придал всему эпизоду юмористическую окраску. В рассказе «Когда я служил секретарем» он пишет:

«Что есть слава? Порождение случая! Сэр Исаак Ньютон открыл, что яблоки падают на землю, – честное слово, такие пустяковые открытия делали до него миллионы людей. Но у Ньютона были влиятельные родители, и они раздули этот банальный случай в чрезвычайное событие, а простачки подхватили их крик. И вот в одно мгновение Ньютон стал знаменит».

Мандельштам – педагог

О Леониде Исааковиче Мандельштаме я, студент-первокурсник, впервые услышал в 1925 году на заседании предметной комиссии по физике Московского государственного университета. В эту комиссию, наряду с преподавателями, входили и представители студентов. Председатель сообщил, что удалось пригласить для работы в МГУ очень крупного ученого, известного физика Л.И. Мандельштама. Мы, студенты, естественно, были заинтригованы.

Вскоре начались знаменитые мандельштамовские семинары. Студент-старшекурсник С. Шубин, ставший потом видным физиком-теоретиком и почему-то опекавший меня, посоветовал ходить на эти семинары. Он сказал: «Поначалу ты мало что будешь понимать, но зато почувствуешь дух настоящей науки». Обе части его предсказания оправдались.

На семинарах Л.И. все было для нас необычно. Прежде

всего – состав семинара. В нем участвовали не только студенты и аспиранты, но и многие наши преподаватели и совсем посторонние для нас, студентов, люди. В связи с этим семинары проводились в самой большой аудитории. «Взрослые» занимали первые скамьи в аудитории, несколько дальше сидели студенты.

На семинаре царила атмосфера доброжелательного внимания к высказыва-



Опубликовано в «Кванте»
№7 за 1979 год.

ниями любого участника, независимо от его научного «ранга». Никто не боялся задавать «глупые» вопросы, многие из которых, после тщательного обсуждения, оказывались далеко не такими «глупыми», как это казалось сначала. Вместе с тем любая физическая ошибка выяснялась и критиковалась в четкой, но не обидной форме. Решающую роль в создании такой атмосферы доброжелательности и корректности играли личные качества Л.И. Словами трудно передать его обаяние. Каждая встреча с ним была для нас радостью. Когда по каким-либо причинам Л.И. отсутствовал на семинаре, студенты говорили «чай без сахара».

Обычно Л.И. предварял доклад кого-либо из участников семинара несколькими краткими замечаниями, а после доклада подводил итоги. Нас поражала его способность излагать самые сложные вопросы просто и, с другой стороны, умение обнаруживать сложности в простых, на первый взгляд, вопросах. Недаром в те годы у физиков появился термин «манделштамовская ясность».

Когда на четвертом курсе подошла моя очередь выступать в качестве докладчика на семинаре, я лично убедился в том, какую большую работу проводили Л.И. и его сотрудники, готовя нас к выступлению. Сам Л.И. был блестящим лектором и докладчиком. Ученик его С.М. Рытов пишет в своих воспоминаниях: «Я много думал над тем, в чем «секрет» совершенно особого воздействия выступлений Л.И., того эмоционального подъема, который они всегда вызывали. Его лекция и доклады захватывали аудиторию, заставляли забывать обо всем на свете и переживать услышанное. Так бывает с лучшими произведениями театра или кино, вообще искусства. Но... «оружием» Л.И. было не красноречие или «театральщина», а замечательное умение поразить слушателей, задеть их за живое, зажечь интерес и заставить увидеть вопросы там, где, казалось бы, все уже ясно в силу сказанного ранее».

Я невольно, как бывший студент Л.И., начал с характеристики Манделштама-педагога, но это отнюдь не означает, что для него преподавание было главным делом. Правильнее будет сказать, что у Л.И. трудно было провести четкую границу между исследовательской деятельностью и преподаванием.

Манделштам – ученый

В 1929 году Л.И. Манделштам был избран академиком. Выдающийся ученый, он создал одну из самых крупных

советских научных школ в области физики. Его ученики – академики А.А.Андронов и М.А.Леонтович, член-корреспондент С.М.Рытов, профессора Г.С.Горелик, А.А.Витт, С.Э.Хайкин, С.П.Стрелков. Его близкие сотрудники – академики Г.С.Ландсберг и И.Е.Тамм. Нельзя не упомянуть о близком друге Л.И. академике Николае Дмитриевиче Папалекси, с которым он работал совместно 45 лет. Все это – крупные имена в науке. Сейчас успешно работают научные «внуки» и «правнуки» Л.И.

Для того чтобы было понятно, как складывался круг научных интересов Л.И., нужно привести некоторые краткие биографические данные. Окончив в 1897 году гимназию с золотой медалью, Л.И. поступил на математическое отделение физико-математического факультета Новороссийского университета. Однако в 1899 году, в связи со студенческими беспорядками, он был исключен из университета и уехал за границу, в Страсбург, где поступил на физико-математический факультет университета. Кафедру физики в этом университете занимал выдающийся ученый Ф.Браун, получивший в 1909 году Нобелевскую премию за работу по радиотелеграфии. Он же был директором образцового для того времени физического института в Страсбурге.

Браун очень скоро оценил исключительные способности Л.И. и привлек его к научной работе в области физики электромагнитных колебаний. Первая научная статья Л.И. была посвящена определению времени затухания колебаний в контуре.

После окончания университета Л.И. в качестве ассистента Брауна продолжал активную исследовательскую работу, совмещая ее с участием в заводских испытаниях новой радиоаппаратуры. В этот период Л.И. сделал свое первое (из 60!) изобретение, позволившее существенно повысить чувствительность приемной радиоаппаратуры. Характерно, что это изобретение, имевшее большую практическую ценность, было сделано на основе проведенного Л.И. теоретического анализа.

Всю последующую жизнь Л.И. занимался главным образом физикой и техникой колебаний и волн самой различной природы, поразительно сочетая творческую деятельность в столь разнородных областях, как проблемы теоретической физики, тонкости физического эксперимента и решение конкретных инженерных задач. А.А.Андронов в докладе, посвященном первой годовщине со дня смерти Л.И., очень правильно сказал: «...в наше время резкого деления физиков на

теоретиков и экспериментаторов, на «чистых» физиков и «технических» физиков Л.И. — одновременно теоретик и экспериментатор, «чистый» физик и «технический» физик». К этим словам хочется добавить, что Л.И. умел ценить творческое начало в любой, даже очень далекой от науки и искусства области. Помню, с каким восхищением он говорил об изобретении застежки «молния», в то время — новинки, и интересовался, кто сделал это остроумное изобретение.

К страсбургскому периоду относится также полемика Л.И. со знаменитым уже в то время физиком, родоначальником квантовой теории Максом Планком. Л.И., несмотря на врожденную скромность и мягкость характера, твердо стоял на том, что у Планка в работе, посвященной волновой теории распространения света в прозрачных средах, есть принципиальная ошибка. После длительной полемики Планк признал правоту Мандельштама. Этот эпизод интересен еще и тем, что здесь проявилась способность Л.И. находить аналогию между явлениями в далеких друг от друга областях физики. В споре с Планком, судя по всему, Л.И. была использована аналогия между соседними атомами среды с колеблющимися в них электронами и близко расположенными работающими радиодантными.

В те же годы Л.И. начал цикл работ по молекулярному рассеянию света.

Каждый знает, что в мутной среде, будь то туман или молочное стекло, свет рассеивается. Причиной рассеяния является оптическая неоднородность среды. Например, капельки воды, образующие туман, имеют показатель преломления, резко отличающийся от показателя преломления воздуха. Казалось бы, в чистом воздухе не должно быть рассеяния света. Однако это не так. То, что мы видим над собой голубое небо, есть результат рассеяния солнечного света молекулами воздуха земной атмосферы. (Недаром в очень высоких горах небо даже днем кажется темным.) Молекулярное рассеяние света происходит также из-за оптической неоднородности среды; но причиной этой неоднородности является хаотическое тепловое движение атомов или молекул. Это движение приводит к случайному возрастанию концентрации атомов или молекул в одних точках среды и убыванию в других. Такие отклонения плотности от среднего значения называются флуктуациями плотности. Эти флуктуации вызывают, в свою очередь, локальные изменения показателя преломления среды, а среда становится оптически неоднород-

ной, рассеивающей свет. Л.И. в 1913 году опубликовал работу о молекулярном рассеянии света при отражении от поверхности жидкости, обладающей шероховатостью опять-таки за счет хаотического теплового движения молекул. Эту работу, содержащую и теорию явления, и описание эксперимента, Эйнштейн доложил на своем семинаре и прислал Л.И. открытку, в которой назвал работу «красивой».

В 1914 году, когда начала надвигаться угроза войны, Л.И. вернулся на родину.

Эффект Мандельштама – Бриллюэна

Продолжая размышлять над проблемами молекулярного рассеяния, Л.И. в 1918 году пришел к выводу, что процесс рассасывания флуктуаций плотности в среде должен вызывать модуляцию амплитуды рассеянных флуктуациями световых волн. Всякая модуляция волн вызывает изменение их частоты. Например, при радиопередаче диктор, говоря в микрофон, модулирует со звуковыми частотами амплитуду радиоволн, и в излучении радиостанции кроме основной, несущей, частоты появляются боковые полосы частот.

Процесс возникновения и рассасывания флуктуаций можно представить как результат наложения упругих акустических волн, распространяющихся в среде по всевозможным направлениям со скоростью звука. Эти волны модулируют рассеянную веществом световую волну. Так что в рассеянном свете помимо основной, несущей, частоты ν_0 (частота падающего света) появляются дополнительные частоты $\nu_0 + \Delta\nu$ и $\nu_0 - \Delta\nu$, где $\Delta\nu$ – частота модулирующих акустических колебаний.¹ Относительное изменение частоты $\Delta\nu/\nu$ равно отношению скорости звука в веществе к скорости света. Скорость звука даже в твердых кристаллах типа кварца составляет около $6 \cdot 10^3$ м/с, а скорость света равна $3 \cdot 10^8$ м/с, так что относительное изменение частоты составляет тысячные доли процента. Таким образом, модуляция при рассеянии света на

¹ Для знающих тригонометрию. Амплитуда модулирующей с частотой $\Delta\nu$ волны может быть записана так: $A(t) = a(1 + \cos(2\pi\Delta\nu t))$. Тогда полное выражение для модулированной волны: $A(t)\cos(2\pi\nu_0 t) = a(1 + \cos(2\pi\Delta\nu t))\cos(2\pi\nu_0 t) = a\cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{a}{2}\cos(2\pi(\nu_0 + \Delta\nu)t) + \frac{a}{2}\cos(2\pi(\nu_0 - \Delta\nu)t)$, т.е. модулированная волна равна сумме трех волн с частотами, указанными в тексте.

флуктуациях плотности – очень тонкий эффект. К этому надо добавить, что интенсивность молекулярного рассеяния весьма мала (10^{-6} или 10^{-7} от интенсивности падающего света).

Долгое время Мандельштам не имел возможности поставить тонкие эксперименты по проверке своего теоретического предсказания; поэтому он опубликовал соответствующую статью только в 1926 году. В 1922 году появилась статья французского физика Бриллюэна, содержащая часть теоретических результатов Л.И. Описанное явление было позднее экспериментально обнаружено и получило название эффекта Мандельштама – Бриллюэна. Однако до этого было сделано очень важное открытие.

Открытие комбинационного рассеяния света

В 1925 году, после прихода Л.И. в Московский университет, он, совместно с Г.С.Ландсбергом, приступил к экспериментам по исследованию молекулярного рассеяния света в кристаллах с целью обнаружить указанный выше эффект.

Трудности были весьма велики. Надо было прежде всего надежно выделить слабое молекулярное рассеяние, забиваемое обычно сильным рассеянием света на дефектах структуры кристаллов. Здесь Ландсбергом был применен остроумный прием. С повышением температуры растет скорость теплового движения атомов, молекул или ионов вещества, а это приводит к росту величины флуктуаций. С ростом же величины флуктуаций увеличивается интенсивность молекулярного рассеяния. Вместе с тем рассеяние на дефектах кристалла не зависит от температуры. Поэтому повышение температуры образца позволяет выделить молекулярное рассеяние в «чистом виде». Именно этот факт и предложил использовать Ландсберг.

Однако в МГУ не было спектральной аппаратуры, способной обнаружить малые изменения частоты, соответствующие эффекту Мандельштама – Бриллюэна. Мандельштам и Ландсберг попытались обойти это затруднение, используя сравнительно грубый спектрограф.

Как это ни удивительно, грубость аппаратуры сыграла положительную роль, приведя к открытию совершенно нового важного явления – комбинационного рассеяния света. При комбинационном рассеянии – КР – возникают большие изменения частоты, на несколько порядков превышающие эффект Мандельштама – Бриллюэна. Чувствительная аппаратура,

необходимая для наблюдения эффекта Мандельштама – Бриллюэна, оказалась бы слишком «деликатной» для обнаружения КР.

В схеме экспериментальной установки для исследования рассеяния света в кристаллах в качестве источника света использовалась ртутная лампа, спектр которой состоит из ряда спектральных линий (рис.1,а). В спектре света, рассеянного кристаллом кварца, около каждой яркой линии ртути было обнаружено появление дополнительных линий – спутников или, как их называют, сателлитов (рис.1,б). Однако частоты, соответствующие этим линиям, отличались от частоты падающего света на гораздо большую величину, чем это



Рис. 1. а) Спектр ртутной лампы;
б) спектр рассеянного света

ожидалось по теории эффекта Мандельштама – Бриллюэна. Это новое явление и получило название комбинационного рассеяния. Первые снимки спектров КР были получены в МГУ в 1927 году. Однако первое сообщение о сделанном открытии

было отправлено в печать только 6 мая 1928 года. Задержка была вызвана необычайно высокой требовательностью Л.И. к уровню своих публикаций. Время ушло на проведение контрольных опытов, подтвердивших реальность наблюдаемого явления, и на нахождение правильного его объяснения. В результате этой задержки сообщение индийского физика Рамана об открытии аналогичного явления при рассеянии света в жидкостях опередило сообщение советских физиков на пару месяцев.

Большинством крупных физиков (Резерфорд, Борн и др.) было признано, что открытие комбинационного рассеяния сделано Ландсбергом и Мандельштамом в кристаллах и Раманом в жидкостях независимо друг от друга и практически одновременно. Однако в 1930 году Нобелевская премия за это открытие была присуждена одному Раману, что было явной несправедливостью.

Л.И., исходя из классических соображений, указал, что КР в кристаллах, так же, как и эффект Мандельштама – Бриллюэна, возникает благодаря модуляции рассеянного света колебаниями кристаллической решетки. Однако в данном случае роль модулирующих колебаний играют не акустические, а так называемые оптические колебания решетки. Частоты этих колебаний лежат в инфракрасной области

спектра. На рисунке 2 изображены два типа волн, возникающих в кристаллической решетке, построенной из атомов двух сортов. Рисунок 2,а соответствует звуковой волне и, следовательно, акустическим колебаниям решетки. Рисунок 2,б соответствует оптическим волнам и колебаниям. Именно эти

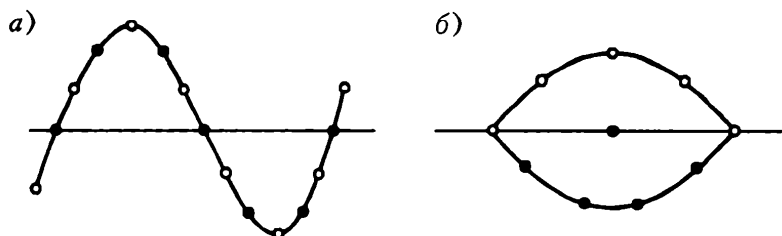


Рис.2. Два типа волн, возникающих в кристаллической решетке, построенной из атомов двух сортов. а) Акустическая волна; б) оптическая волна.

оптические колебания модулируют падающую на кристалл световую волну, что и вызывает комбинационное рассеяние света.

При КР в жидкостях и газах модуляцию света вызывают колебания атомов, входящих в состав отдельных молекул. Согласно классической теории модуляции, при КР в спектре рассеянного света около каждой спектральной линии падающего света должно возникать несколько симметрично расположенных линий – спутников. Частоты спутников получают путем комбинирования частоты падающего света с частотами внутримолекулярных колебаний (отсюда и происходит название явления) и удовлетворяют простым соотношениям

$$\nu_k = \nu_0 - \nu_m, \quad \nu_\phi = \nu_0 + \nu_m, \quad (1)$$

где ν_k – частота «красного» спутника, т.е. линии, смещенной относительно основной (из спектра падающего света) в сторону больших длин волн, ν_ϕ – частота «фиолетового» спутника, т.е. линии, смещенной в сторону меньших длин волн, ν_m – частота внутримолекулярных колебаний (частота модуляции).

Соотношения (1) прекрасно согласуются с опытом. Однако, согласно классической теории, интенсивности симметрично расположенных спутников должны быть одинаковыми. Этот вывод находится в резком противоречии с опытом. Интенсивность каждого «красного» спутника во много раз больше интенсивности симметричного ему «фиолетового» спутника. Это различие интенсивностей нельзя объяснить

исходя из классической теории модуляции. Необходимо учесть квантовые свойства света и вещества.

Согласно классическим представлениям, два симметрично расположенных спутника возникают при рассеянии света на одной и той же молекуле. Согласно квантовым представлениям, «красный» спутник возникает при рассеянии света – фотонов – на молекуле, обладающей меньшим запасом внутренней энергии, а «фиолетовый» – при рассеянии на возбужденной молекуле с увеличенным запасом энергии (на классическом языке эти молекулы отличаются амплитудой внутримолекулярных колебаний). Согласно квантовым законам, энергия внутримолекулярных колебаний может изменяться только определенными порциями, квантами, равными $h\nu_m$, где h – постоянная Планка, ν_m – частота внутримолекулярных колебаний. На рисунке 3 приведены два энергетических уровня, соответствующие дозволённым значениям энергии молекулы.

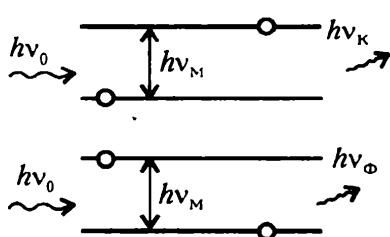


Рис.3. Возникновение «красных» и «фиолетовых» спутников при КР

молекулу на более высокий энергетический уровень и превращается в фотон с меньшей энергией:

$$h\nu_k = h\nu_0 - h\nu_m, \quad (2)$$

где $h\nu_k$ – энергия фотона «красного» спутника. При взаимодействии с возбужденной молекулой, находящейся на более высоком энергетическом уровне, фотон забирает у молекулы энергию, равную $h\nu_m$, переводит молекулу на более низкий энергетический уровень и превращается в фотон с большей энергией:

$$h\nu_\phi = h\nu_0 + h\nu_m, \quad (3)$$

где $h\nu_\phi$ – энергия фотона «фиолетового» спутника. Можно сказать, что при комбинационном рассеянии происходит как бы сложение и вычитание квантов.

Если в равенствах (2) и (3) сократить левую и правую части на h , то получатся равенства (1). Таким образом, в смысле частот и классическое, и квантовое рассмотрения приводят к одинаковым результатам, согласующимся с опытом. Зато квантовое рассмотрение с легкостью объясняет различие интенсивностей «красных» и «фиолетовых» спутников. Все дело в том, что обычно число молекул на нижнем энергетическом уровне значительно превышает число молекул на более высоком уровне. Поэтому число «столкновений» фотонов с молекулами, приводящих к возникновению фотонов «красного» спутника, во много раз превышает число «столкновений», приводящих к возникновению фотонов «фиолетового» спутника.

Комбинационное рассеяние получило очень широкое применение в исследовании структуры молекул и кристаллов. Недаром Л.И. говорил: «Так же как спектр обычного радиотелефонного передатчика несет в себе весь ваш разговор, все, что вы хотите сказать, так и спектр рассеянного света несет то, что молекула говорит о себе. Изучая его, вы изучаете ее строение».

* * *

Я смог рассказать только о небольшой части научных работ Л.И. Мандельштама. Им получен еще ряд фундаментальных результатов в теории колебаний (новые виды резонанса, теория нелинейных колебаний и т.д.). Особое внимание Л.И. уделял степени экспериментальной и логической обоснованности физических теорий.

Несколько слов об отношении Л.И. к искусству. Без этого портрет его будет неполным. Л.И. был глубоким ценителем литературы и музыки. Любимым поэтом его был Пушкин, почти всю поэзию которого он знал наизусть.

Последний раз я встретил Леонида Исааковича в 1944 году на концерте бетховенской музыки в Московской консерватории. Он стоял в фойе, и его лицо буквально светилось радостью. Увидев меня, Л.И. сказал, что, собираясь на концерт, сильно волновался – придут ли люди слушать музыку немецкого композитора, когда идет такая тяжелая война с Германией, и был очень обрадован тем, что уже на дальних подступах к консерватории у него стали спрашивать, нет ли лишнего билета. Таким он запомнился мне на всю жизнь.

И свет, и жар

Мы так привыкли к электрическому освещению, что порой не ценим его должным образом и забываем его историю. Первой появилась электрическая лампа накаливания.

«Вынимает
 паршивую
 запаянную склянь.
«Это, – говорит, –
 электрическая лампа»...
Видю –
 склянка.
 В склянке –
 волос.
Но, между прочим,
 не из бороды и не из усов...
Сверху
 из склянки
 и свет,
 и жар –
солнце,
 ей-богу, солнце!»

– так писал Маяковский в стихотворении «Горящий волос».

Поэт прав, указывая, что «из склянки и свет, и жар», но, как и положено поэтам, он преувеличивает, сравнивая лампу накаливания с Солнцем. Между светом лампы накаливания и солнечным светом имеются очень важные различия. Прежде всего, свет лампы накаливания гораздо желтее солнечного света. Кроме того, в излучении лампы накаливания «жар» гораздо сильнее по отношению к «свету», чем в излучении Солнца. Оба отличия вызваны одной и той же причиной: температура нити («волоса») лампы накаливания (3000 °С) примерно в два раза ниже температу-

Опубликовано в «Кванте» №3 за 1980 год.

ры поверхности Солнца (6000 °С).

Перейдем от поэзии к цифрам, и мы натолкнемся на интересный парадокс. Лампа накаливания представляет почти идеальный преобразователь электрической энергии в энергию излучения (с коэффициентом полезного действия, близким к единице), и вместе с тем лампа накаливания – очень неэкономичный источник света. Как же такое возможно?

Оказывается, все дело в том, что человеческий глаз реагирует не на любое излучение, а только на узкий участок спектра электромагнитных волн (рис.1) с длинами волн от 0,4 мкм до 0,8 мкм (от фиолетовых до красных лучей). Только такое излучение является светом в точном смысле этого слова.

На рисунке 2 показан баланс энергии современной лампы накаливания. Мы видим, что, хотя лампа накаливания превращает в излучение 86% подводимой к ней электроэнергии, только 12% превращается в видимый свет. В невидимое тепловое излучение (инфракрасные лучи), т.е. в «жар» по Маяковскому, превращается 74%! Как источник лучистого «жара» лампа накаливания близка к идеалу. Это было учтено, и сейчас на производстве широко применяют быструю сушку окрашенных изделий (например, корпусов автомобилей) с помощью инфракрасных лучей, испускаемых лампами накаливания.

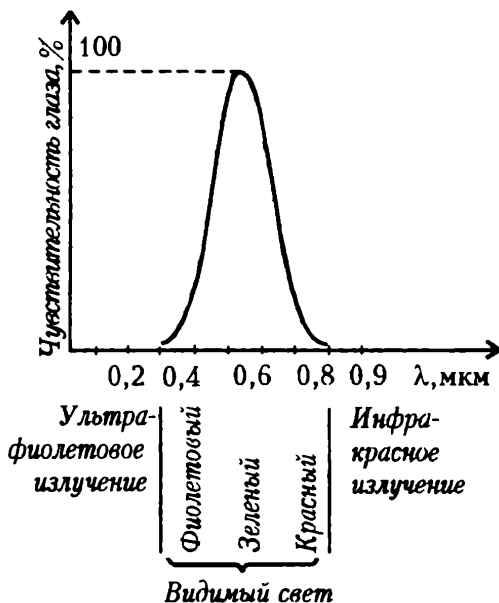


Рис.1. Кривая чувствительности глаза человека

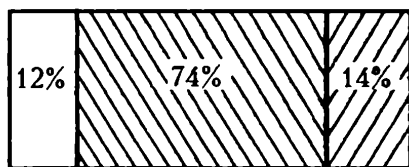


Рис.2. Баланс энергии в лампе накаливания: 12% – световое излучение, 74% – инфракрасное излучение, 14% – тепловые потери через вводы и держатели и через газ

Недостатки лампы накаливания как источника видимого света заставили ученых искать новые источники света, более экономичные в случае преобразования электрической энергии в световую и дающие свет, более близкий к солнечному по цветовым свойствам. Таким образом, задача состояла как в увеличении светоотдачи, так и в улучшении качества света.

У С.И.Вавилова возникла идея использовать в этих целях явление холодного свечения, называемое люминесценцией. Если Солнце или лампа накаливания представляют тепловые источники, в которых излучение возникает за счет нагрева до высокой температуры, то свечение люминофора (люминесцирующего тела) не связано, как правило, с его нагревом.

Нас будут интересовать так называемые фотолюминофоры, свечение которых вызывается облучением их светом от внешнего источника. Фотолюминофоры преобразуют излучение с одними длинами волн в излучения с другими длинами волн. Многие органические красители (например, оранжевая краска родамин) обладают яркой люминесценцией под действием дневного света.

Современное учение о фотолюминесценции многим обязано С.И.Вавилу. В частности, С.И.Вавилов показал, что люминофоры – как преобразователи энергии излучения – могут обладать весьма высоким коэффициентом полезного действия. Это свойство, очевидно, очень важно для практического применения люминофоров.

Принцип действия люминесцентной лампы

Казалось бы, можно улучшить характеристики лампы накаливания, нанеся на стенки ее колбы слой люминофора и превратив с помощью фотолюминесценции инфракрасное излучение раскаленной нити в видимый свет. К сожалению, такой путь нереален. Существует закон (так называемое правило Стокса), согласно которому люминофоры, как правило, преобразуют более короткие волны в более длинные, а длины волн инфракрасных лучей всегда больше, чем длины волн видимого света ($> 0,8$ мкм).

Следовательно, для возбуждения свечения во всем диапазоне видимой части спектра необходимо использовать ультрафиолетовое излучение, обладающее меньшими длинами волн ($< 0,4$ мкм). Тогда задача распадается на две: 1) отыскание экономичного источника ультрафиолетового из-

лучения; 2) создание люминофора, эффективно преобразующего ультрафиолетовое излучение в видимый свет (при этом нельзя забывать и о цветовых свойствах видимого света).

Исследования показали, что подходящим источником ультрафиолетового излучения является электрический разряд в парах ртути. Правда, состав излучения ртутного разряда очень сильно зависит от давления паров.

При высоком давлении (равном или превышающем атмосферное давление 10^5 Па) преобладает длинноволновое ультрафиолетовое излучение ($\geq 0,3$ мкм). Кроме него возникает также видимое излучение, состоящее из желтых, зеленых и синих лучей. Так происходит, в частности, в ртутных кварцевых лампах, применяемых для медицинских целей. Свет этих ламп имеет мертвящий сине-зеленый оттенок, объясняемый составом видимого излучения ртутного разряда. Превратив с помощью люминофора ультрафиолетовое излучение в красное, можно несколько смягчить недостатки цветовых свойств света ртутных ламп высокого давления и использовать эти лампы для уличного и частично для промышленного освещения.

При низком давлении ртутных паров основную роль играет коротковолновое ультрафиолетовое излучение (с длиной волны $\approx 0,25$ мкм), а видимое излучение очень слабое. Такой разряд в сочетании с люминофорами может обеспечить высокие цветовые свойства видимого света. Именно так и устроены люминесцентные лампы (рис.3). Основным источником видимого света в люминесцентной лампе служит люминофор, который наносится на внутреннюю поверхность стеклянной колбы лампы. Оптимальное давление паров ртути равно примерно 1,33 Па. По причинам, которые станут ясны позднее, в колбе, кроме паров ртути, содержится также инертный газ аргон при давлении 5,32 Па.

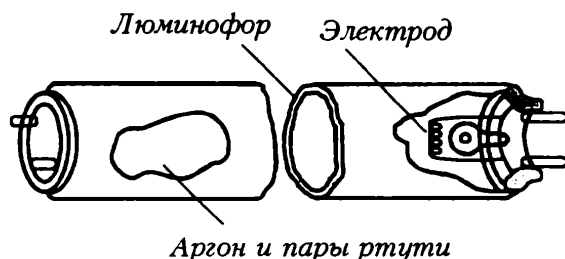


Рис.3. Разрез люминесцентной лампы

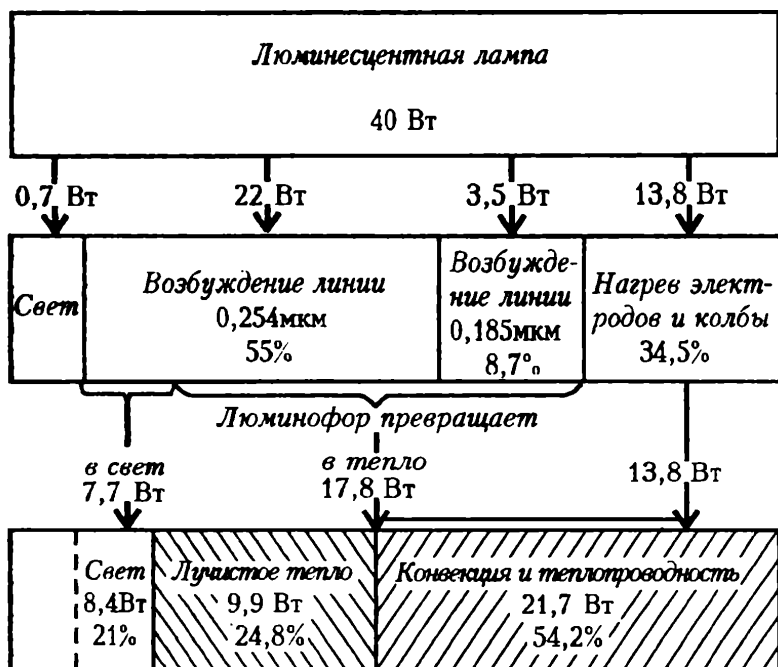


Рис. 4. Баланс энергии 40-ваттной «белой» люминесцентной лампы

В люминесцентной лампе происходят два последовательных преобразования энергии. Сначала подводимая электроэнергия в парах ртути превращается в энергию коротковолнового ультрафиолетового излучения (около 60%), затем энергия этого излучения в люминофоре превращается в энергию видимого светового излучения. На рисунке 4 изображен баланс энергии такой лампы. Если сравнить рисунки 2 и 4, можно подумать, что световая эффективность люминесцентной лампы менее чем в два раза превышает световую эффективность лампы накаливания (21/12). Оказывается, это не так. Благодаря свойствам глаза отношение световых эффективностей значительно превышает отношение энергетических коэффициентов полезного действия.

Любопытно, что тепловые потери в обеих лампах приблизительно одинаковы (79% и 88%). Однако имеется различие в составе этих потерь – доля лучистого тепла в люминесцентной лампе в три раза меньше, чем в лампе накаливания. Поэтому при люминесцентном освещении легче избежать нагрева освещаемых предметов («жар» и свет идут по разным путям).

Рассмотрим по отдельности, как возникает ультрафиолетовое излучение и как оно преобразуется в видимый свет.

Механизм генерации излучения в газовом разряде

Как уже говорилось, источником ультрафиолетового излучения в люминесцентной лампе является электрический разряд в ртутных парах при низком давлении. Электроны, вырвавшиеся с катода и разогнанные электрическим полем, встретив на своем пути атомы ртути, испытывают с ними соударения.

Характер соударений, оказывается, зависит от энергии электронов. Если энергия электрона меньше 4,9 эВ, соударение его с атомом ртути носит упругий характер – кинетическая энергия электрона практически не изменяется, а изменяется лишь направление его движения. При энергии, равной (или превышающей) 4,9 эВ, соударение электрона с атомом ртути становится неупругим – электрон отдает всю (или почти всю) свою энергию атому ртути. Это – одно из проявлений квантовых свойств атомов.

Согласно квантовым представлениям, каждый атом может обладать лишь определенными запасами энергии, или, как говорят, он может находиться лишь на вполне определенных энергетических уровнях. Следовательно, и принимать атом может лишь определенные порции энергии. Так, для атома ртути такой минимальной порцией является энергия 4,9 эВ. Меньшую энергию атом ртути не принимает (проявляется его «квантовая гордость»). Что же происходит с атомом дальше?

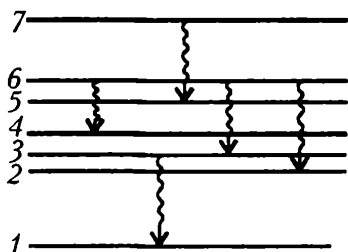


Рис.5. Схема энергетических уровней атома ртути. Переход 3 → 1 дает ультрафиолетовую линию с длиной волны 0,25 мкм; переход 6 → 2 дает фиолетовую линию с длиной волны 0,40 мкм; переход 6 → 3 дает синюю линию с длиной волны 0,45 мкм; переход 6 → 4 дает зеленую линию с длиной волны 0,55 мкм; переход 7 → 5 дает желтую линию с длиной волны 0,58 мкм

На рисунке 5 изображена очень грубая схема энергетических уровней атома ртути. В результате неупругого столкновения с электроном атом переходит в возбужденное состояние, соответствующее энергетическому уровню 3, «живет» на этом уровне примерно 10^{-7} с и возвращается обратно на уровень 1.

Заметим, что атомы аргона, хотя их число превышает число атомов ртути в сотни раз, совершенно не возбуждаются. Связано это с тем, что минимальная энергия возбуждения атомов аргона значительно выше, чем у атомов ртути.

Возникает вопрос: почему для генерации излучения с длиной волны 0,25 мкм выгодно использовать низкое давление ртутных паров? Ведь с увеличением давления растет число атомов ртути и, как будто, должно расти число неупругих столкновений электронов с атомами. Однако это не так. Рассмотрим более подробно судьбу возбужденного атома и испускаемого им фотона.

Жизнь возбужденного атома чревата опасностями. При столкновениях с другими частицами (электронами, атомами) или со стенками колбы атом может потерять свою энергию и перейти в нормальное (невозбужденное) состояние. Такие безызлучательные («тушащие») переходы бесполезны с точки зрения генерации излучения. Очевидно, что с ростом давления число безызлучательных переходов растет. Этому же способ-

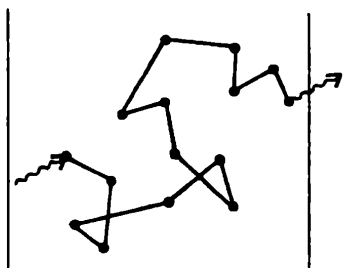


Рис.6. Путь фотона в объеме разряда

ствует явление «пленения» излучения, связанное со своеобразной фотонной «эстафетой». Фотон, испущенный возбужденным атомом в объеме газа, как правило, не вылетает сразу наружу. Его перехватывает какой-либо нормальный атом и переходит при этом в возбужденное состояние. Через 10^{-7} с этот атом возвращается в нормальное состояние, испуская новый фотон, который опять может быть поглощен

другим нормальным атомом, и так далее. В среднем происходит несколько сот актов переизлучения фотонов. При каждом акте меняется направление полета фотонов, что делает их путь в газе зигзагообразным (рис.6). Это, естественно, увеличивает вероятность безызлучательных переходов, которые могут происходить только во время «остановок» фотонов в атомах. Ясно, что число «остановок» растет с ростом концентрации атомов, т.е. с ростом давления газа.

Механизм преобразования излучения в люминофоре

Преобразование невидимого ультрафиолетового излучения в видимый свет происходит в люминофоре. Характер свечения люминофора определяется его составом.

В современных люминесцентных лампах чаще всего применяются галофосфаты кальция. Это сложные соединения, сходные с апатитами ($3\text{Ca}(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2$), в которых часть атомов фтора заменена атомами хлора и, главное, в которые введены активаторы. Активаторами называют атомы примесей, вызывающие свечения люминофора. Концентрация атомов активатора очень невелика – порядка процента, иногда даже долей процента, но без активатора люминофор мертв и свечения не дает.

В качестве активаторов в галофосфаты вводят одновременно атомы сурьмы и марганца. В кристалле галофосфата эти атомы превращаются в ионы. Поглотив ультрафиолетовое излучение, ионы возбуждаются, и, возвращаясь в исходное нормальное состояние, высвечивают поглощенную энергию в виде света. При этом в спектре излучения такого люминофора наблюдаются две широкие полосы, соответствующие излучению ионов сурьмы и марганца. Широкие полосы возникают за счет воздействия на ионы активаторов атомов окружающей среды, прежде всего – атомов хлора, без этого они испускали бы узкие линии. Часть ионов сурьмы, возбужденных в результате поглощения ультрафиолетового излучения, передают свою энергию ионам марганца, побуждая их к свечению. Варьируя концентрацию активаторов и содержание хлора в люминофоре, можно в широких пределах изменять спектральный состав свечения.

Надо откровенно сказать, что далеко не все детали процесса преобразования излучения в люминофорах типа галофосфатов уже выяснены. Однако следует помнить замечание известного математика О.Хевисайда: «Стану ли я отказываться от своего обеда только потому, что я не полностью понимаю процесс пищеварения?»

В последнее время для повышения светоотдачи люминесцентных ламп все шире стали применять люминофоры, активированные редкоземельными элементами (такими, как европий, тербий, церий). Спектральные полосы излучения ионов редкоземельных элементов довольно узки, поэтому для заполнения видимого спектра приходится применять смесь из двух или даже трех люминофоров. Высокая цена редкоземельных элементов и усложненная технология нанесения смеси люминофоров приводит к повышению стоимости ламп, но считается, что повышение светоотдачи ламп с лихвой компенсирует эти недостатки.

Схема включения люминесцентной лампы

Для включения люминесцентной лампы в сеть применяется остроумная, но довольно сложная схема, что, конечно, является недостатком этой лампы. Необходимость специальной схемы включения объясняется двумя обстоятельствами: 1) большой длиной лампы; 2) падающей вольт-амперной характеристикой электрического разряда.

Большая длина лампы необходима для получения высокой светоотдачи, поскольку источником излучения служит положительный столб разряда и потери энергии в приэлектродных частях разряда имеют тем меньший удельный вес, чем длиннее разрядная трубка. Так, сороковаттная лампа имеет длину 110 см. Вместе с тем зажечь электрический разряд в длинной трубке, когда расстояние между электродами велико, не так просто.

Как видно из рисунка 3, на концах лампы имеется по два штырька, к которым приварены вольфрамовые спирали. Если такую спираль нагреть, она начинает испускать электроны, что облегчает зажигание разряда. Однако когда разряд возник, надобность в постороннем нагреве спиралей отпадает – спирали нагреваются за счет их бомбардировки положительными ионами. Так как лампы обычно работают на переменном токе, каждая спираль один полупериод служит катодом, а другой – анодом. Как же осуществляется предварительный нагрев спиралей?

На рисунке 7 изображена схема включения люминесцентной лампы. Как видно из схемы, параллельно лампе *Л* включен стартер *С*, а последовательно с лампой – дроссель *Д*. Стартер представляет собой миниатюрную лампу тлеющего разряда, наполненную

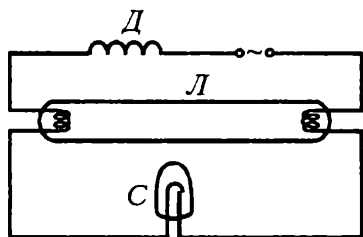


Рис. 7. Схема включения люминесцентной лампы

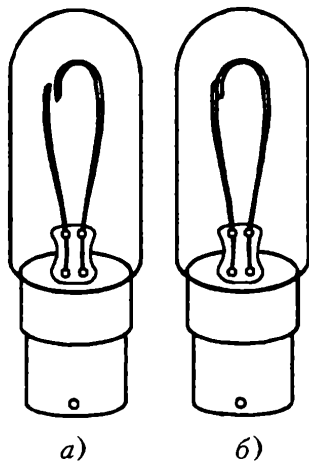


Рис. 8. Стартер: а) электроды холодные; б) электроды нагреты

неоном, с электродами, сделанными из биметаллических пластинок (рис.8). Когда подается напряжение, в стартере возникает разряд (расстояние между электродами стартера порядка миллиметра). Электроды стартера нагреваются, изгибаются навстречу друг другу и закорачивают разрядный промежуток. В цепи возникает большой ток, достаточный для нагрева спиралей люминесцентной лампы. Пока спирали ламп нагреваются, электроды стартера, наоборот, охлаждаются (ведь разряда в стартере нет). Охлаждаясь, электроды стартера выпрямляются, контакт между ними нарушается, и цепь разрывается. Теперь опять имеются два конкурирующих между собой разрядных промежутка – в лампе и в стартере. Но ситуация резко отличается от начальной: электроды лампы накалены и дают большую эмиссию электронов, поэтому разряд возникает не в стартере, а в лампе.

Заметим, что зажигание разряда в люминесцентной лампе сильно облегчено присутствием аргона: возбужденные электронами атомы аргона при столкновении с атомами ртути ионизуют их и тем самым увеличивают число свободных носителей зарядов.

Зачем в схеме включения нужен дроссель? Отличительной особенностью электрического разряда в газе при низком давлении является его падающая вольт-амперная характеристика – с ростом тока напряжение на лампе уменьшается. Чтобы ограничить рост тока, последовательно с лампой надо включить сопротивление. Применение с этой целью дросселя энергетически более выгодно, чем включение омического сопротивления (гораздо меньше тепловые потери). Правда, наличие дросселя снижает коэффициент мощности электрической цепи, но при установке большого числа люминесцентных ламп для компенсации этого недостатка в сеть питания дополнительно включают специальные конденсаторы. Важно отметить также, что благодаря индуктивности дросселя при размыкании цепи стартером на электродах лампы возникает напряжение, превышающее напряжение от источника, что весьма благоприятно для зажигания разряда в лампе.

Применение люминесцентных ламп

Черно-белые телевидение и кино наглядно показывают, насколько было бы обеднено наше восприятие мира в отсутствие цветного зрения. Замечательная способность человечес-

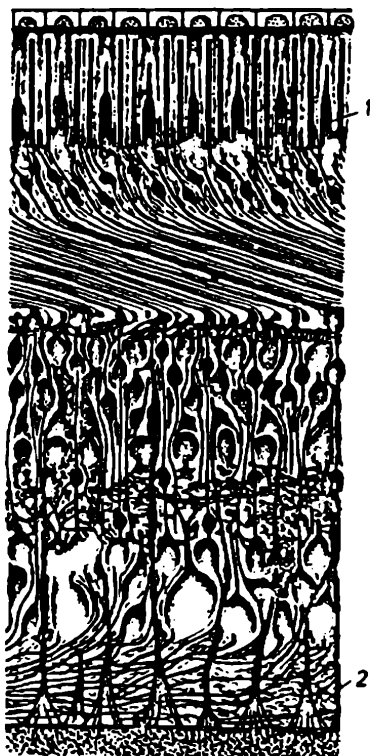
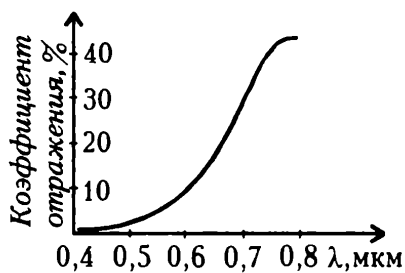


Рис.9. Строение сетчатки глаза человека: 1 – слой палочек и колбочек; 2 – слой волокон зрительного нерва

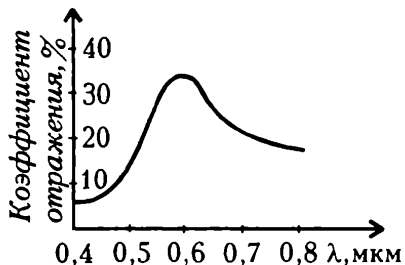
кого глаза различать цвета не только является источником эстетического наслаждения, но имеет и важное практическое значение.

Цветное зрение связано со сложной структурой сетчатки человеческого глаза. В ее состав входят палочки и колбочки – светочувствительные клетки, связанные с окончаниями разветвленного в сетчатке зрительного нерва (рис.9). Палочки более чувствительны и работают даже в условиях слабой освещенности (ночное зрение), но при этом цвета практически не различают («ночью все кошки серы»). Колбочки менее чувствительны и работают только при достаточно большой освещенности (дневное зрение), но зато обеспечивают различение цветов. Для сравнения укажем, что у сов имеются только палочки, поэтому днем они должны щурить глаза. У кур, наоборот, – только колбочки, вот почему они ложатся спать с заходом солнца.

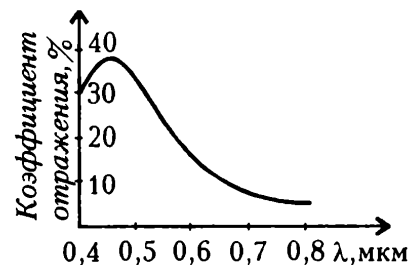
Считается, что в человеческом глазу имеется три типа колбочек. При поглощении света колбочкой одного из этих типов возникает ощущение синего цвета, другого – зеленого цвета и третьего – красного цвета. Воспринимаемый нами цвет предмета зависит от соотношения интенсивностей возбуждения трех указанных типов колбочек. Это соотношение в свою очередь зависит от спектрального состава света, отраженного от предмета и попадающего в глаз. А спектральный состав отраженного света определяется зависимостью коэффициента отражения предмета от длины волны (рис.10) и спектральным составом падающего на предмет света. Так, многие ткани при дневном свете и при свете ламп накаливания имеют совсем разные цвета. Поэтому опытные покупатели в магазине часто подносят покупку к окну, чтобы избежать неожиданностей в дальнейшем. Неприятны изменения цвета при свете ламп накаливания на производстве



а)

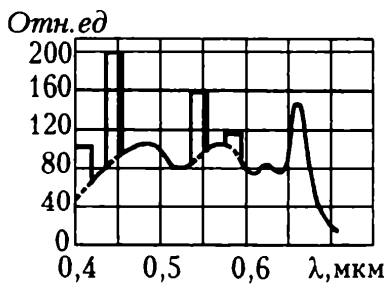


б)

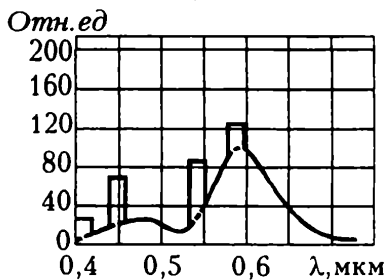


в)

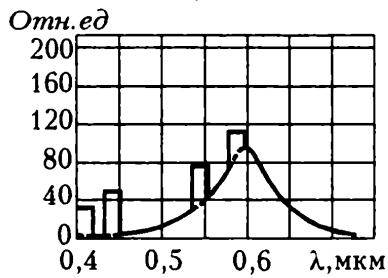
Рис. 10. Спектральные кривые коэффициента отражения красителей: а) красного; б) зеленого; в) синего



а)



б)



в)

Рис. 11. Распределение энергии в спектре люминесцентных ламп: а) «дневного» света; б) «белого» света; в) «теплого» света

окрашенных изделий (в текстильной промышленности, при цветной печати в типографии). То же относится и к картинным галереям.

С помощью люминесцентной лампы можно получить искусственный дневной свет довольно высокого качества. На рисунке 11 изображены кривые распределения энергии в спектре люминесцентных ламп различных типов. К сожалению, ртутный разряд испускает видимые линии спектра (их интенсивность на рисунке изображена прямоугольниками). Наиболее яркие линии – желтая, зеленая и синяя – несколько портят цветовые свойства люминесцентных ламп.

Спектральные кривые люминесцентных ламп показывают, что в их излучении гораздо больше зеленых лучей, чем в излучении ламп накаливания. Это дает дополнительный выигрыш, так как максимум чувствительности глаза лежит именно в зеленой части спектра (см. рис.1). В результате светоотдача люминесцентных ламп в 3—4 раза выше светоотдачи ламп накаливания.

Когда были сделаны первые советские люминесцентные лампы, С.И.Вавилов предложил испытать эти лампы в Третьяковской галерее. Помню, когда мы вместе с известным художником и искусствоведом И.Э.Грабарем впервые приехали в Третьяковку, я поймал себя на мысли — откуда вечером здесь дневной свет? — хотя знал, что незадолго до этого была смонтирована установка. Потом мы брали картины, и И.Э.Грабарь оценивал качество цветопередачи при свете люминесцентных ламп. Много хлопот нам доставил известный портрет Мусоргского работы Репина — отвороты его халата имеют сиреневый оттенок, очень чувствительный к освещению.

В настоящее время на всех предприятиях, где нужна высокая освещенность и хорошая цветопередача, используются люминесцентные лампы. Наряду с лампами «дневного» света (соответствующими рассеянному дневному свету без прямых солнечных лучей), имеются «белые» и «тепlobелые» лампы, вполне пригодные для освещения жилых помещений. Выпуск люминесцентных ламп достиг сотен миллионов штук в год и продолжает расти. Вместе с тем продолжается совершенствование их качества — повышается светоотдача, растет срок службы и улучшаются цветовые характеристики.

Я обязан высшим духовным вдохновением сочинениям Гете, Фауст которого является, быть может, величайшим художественным произведением, Шекспиру и др., но лишь благодаря Шиллеру я стал собой. Без него я был бы человеком с тем же носом и бородою, но я никогда бы не был собой.

Л.Больцман

Довольно давно мой бывший студент И.А.Полетаев, ставший крупным специалистом в области кибернетики, опубликовал, из озорства, статью, в которой противопоставил физику лирике. В этой статье он доказывал, что время лирики прошло и настало время монополии физики. К его удивлению, статья была принята всерьез и вызвала целую бурю. Насколько были уязвлены поэты, можно судить по задорному стихотворению Ильи Сельвинского «Физики и лирики», написанному явно в отместку физикам:

«Да, брат, физики в почете,
Им теперь и черт не брат:
Будто демоны в полете
О Венере говорят.
Но Венера, дура баба,
Их не жалует. Отнюдь.
Поглядишь, поэтик слабый
С нею скрещивает путь.
Вон несется астрофизик
На свиданье под часы.
Треплет ветер... Дождик высек...
«Петухов» дают басы.
Но глядит, глядит, глядит он
На заветное окно,
А Венера с троглодитом
Уж давно сидит в кино.

Опубликовано в «Кванте» №4 за 1982 год.

Вывод

Электроном опаленный,
Открывает физик новь!
Рвется к лире Аполлона
Старомодная любовь».

Такой остроумный писатель, как И.Г.Эренбург, в беседе с И.А.Полетаевым старался привести убедительные аргументы, опровергающие основной вывод его статьи. Как говорил Полетаев, для него главное было не рассмеяться во время этой беседы.

Вряд ли следует подчеркивать, что физики с полным уважением относятся к лирике. Академик Л.И.Мандельштам знал почти всю поэзию своего любимца Пушкина наизусть. Его друг академик Н.Д.Папалекси выше всех поэтов ставил Лермонтова. (Насколько я знаю, это был единственный пункт разногласий между друзьями.) Академик Г.С.Ландсберг, сидя часами в абсолютно темной спектроскопической лаборатории, подряд декламировал всего «Евгения Онегина». Академик С.И.Вавилов даже на фронте не расставался с гетевским «Фаустом». В его книге «Глаз и Солнце» много искусно подобранных поэтических цитат. Он критиковал качество стихотворного перевода на русский язык поэмы древнеримского философа Лукреция Кара «О природе вещей».

Поэты, в свою очередь, проявляли и проявляют интерес к физике. Вот об этом-то и пойдет речь в настоящей заметке. Поэты не всегда в ладах с физикой, но, критикуя их, следует помнить притчу Пушкина «Сапожник», где сказано Критику: «Суди, дружок, не выше сапога!»

Вначале мы напомним стихи, посвященные относительно сти движения.

Прежде всего – шутливое стихотворение М.В.Ломоносова:

«Случились вместе два Астронома в пиру
И спорили весьма между собой в жару.
Один твердил: Земля, вертясь, круг Солнца ходит;
Другой, что Солнце все с собой планеты водит:
Один Коперник был, другой слыл Птолемей.
Тут повар спор решил усмешкою своей.
Хозяин спрашивал: «Ты звезд течение знаешь?
Скажи, как ты о сем сомненье рассуждаешь?»
Он дал такой ответ: «Что в том Коперник прав,
Я правду докажу, на Солнце не бывав,

Задумались сады,
И стало грустно мне.
Он здесь, в моем окне,
Звезды далекой свет,
Хотя бежал ко мне
Сто сорок тысяч лет,
А вам езды-то час,
И долго ли собратья!
А нет, чтоб догадаться
Приехать вот сейчас».

Леонид Мартынов, поэт, внимательно следивший за развитием физической науки, в такой форме отобразил соотношение скоростей звука и света:

«Это почти неподвижности мука.
Мчаться куда-то со скоростью звука,
Зная прекрасно, что есть уже где-то
Некто,
 Летающий
 Со скоростью
 Света!»

А вот стихотворение Михаила Светлова «Голоса», наталкивающее на мысль, что человек со временем, благодаря космическим полетам, сможет услышать голоса ранее живших людей и животных:

«.
И возможно, что за небосклоном
Он живет среди звездных миров –
Не записанный магнитофоном
Околевшего мамонта рев.
Мы – живущие вместе на свете –
Разгадали не все чудеса.
И бредут от планеты к планете
Крепостных мужиков голоса.
И быть может, на всех небосклонах
Повторяется снова сейчас
Несмолкающий шепот влюбленных
И густой Маяковского бас.
Пусть звезда не одна раскололась,
Но понятный и вечно живой
С хрипотцой Циолковского голос
Не замолк на волне звуковой.
С детства не был силен я в науке;
Не вступая с учеными в спор,
Я простер постаревшие руки

В нестареющий синий простор.

.....
Небо полнится голосами

Тех, кто жил и любил на Земле».

Если Светлов прав, то нетрудно рассчитать, с какой сверхзвуковой скоростью должен удаляться космонавт от Земли, чтобы, скажем, за десять лет полета догнать ушедший в космос рев мамонтов. Как известно, мамонты исчезли примерно десять тысяч лет назад.

Дорогой читатель, сделай прикидку и оцени трудности запуска ракеты, летящей с соответствующей скоростью.

К сожалению, самокритика поэта, имеющаяся в данном стихотворении, не лишена оснований. Помня о пушкинской притче, не будем строги к поэту, но, все же, в чем основная физическая ошибка Светлова? Ответ на вопрос настолько прост, что не стоит присылать его к нам в журнал. Подумайте о том, насколько усложнилась бы жизнь на Земле, если бы Светлов был прав.

Преследование определенной цели, далекий свет которой не меркнет от первых неудач, является необходимой предпосылкой, хотя далеко не гарантией успеха.

М.Планк. Нобелевская речь

Эта статья – о замечательном немецком ученом Максе Планке (1858–1947), сделавшем одно из самых великих открытий за всю историю физики. Он открыл существование квантов. Есть не очень достоверный рассказ о том, что, гуляя со своим семилетним сыном, Планк сказал ему: «Или то, чем я занимаюсь теперь, есть совершенная бессмыслица, или речь идет, быть может, о самом большом открытии в физике со времен Ньютона». Действительно, сделанное Планком открытие поставило его имя в один ряд с именами выдающихся физиков мира. Но путь к открытию был долг и труден – речь шла о начале всей квантовой физики.

Интересен вопрос о том, благом ли было бы для человечества отсутствие этих трудностей. У Достоевского в «Днев-

нике писателя» дан ответ: «Ну, что вышло бы, например, если ... вдруг посыпался бы ряд открытий вроде таких, что солнце стоит, а земля вокруг него обращается (потому что, наверно, есть еще много таких же точно, по размерам, открытий, которые теперь еще не открыты, да и не сняты мудрецам нашим); вдруг все знания так и свалились бы на человечество, и, главное, со-



Опубликовано в «Кванте» №4
за 1983 год.

вершенно даром, в виде подарка? Я спрашиваю: что бы тогда случилось с людьми? О, конечно, сперва все бы пришли в восторг... Но вряд ли и на одно поколение людей хватило бы этих восторгов! Люди вдруг увидели бы, что жизни уже более нет у них, нет свободы духа, нет воли и личности, что кто-то все украл разом... Поняли бы люди, что нет счастья в бездействии, что погаснет мысль не трудящаяся... Настанет скука и тоска: все сделано и нечего более делать, все известно и нечего более узнавать».

Планк учится

Интерес к изучению физики у Планка пробудился еще в гимназии. В своей автобиографии он с большой теплотой вспоминает своего преподавателя Г.Мюллера — «общительного, пронизательного, остроумного человека, умевшего на ярких примерах объяснить смысл тех физических законов, о которых он нам, ученикам, говорил. Так получилось, что в качестве первого закона, не зависящего от человека и имеющего абсолютное значение, я, как откровение, воспринял принцип сохранения энергии. Незабываем для меня рассказ Мюллера о том, как каменщик с трудом втаскивает на крышу дома тяжелую черепицу. Работа, которую он при этом совершает, не теряется, она полностью сохраняется, возможно, на долгие годы, до тех пор, пока в один прекрасный день эта черепица, быть может, сорвется и свалится кому-нибудь на голову».

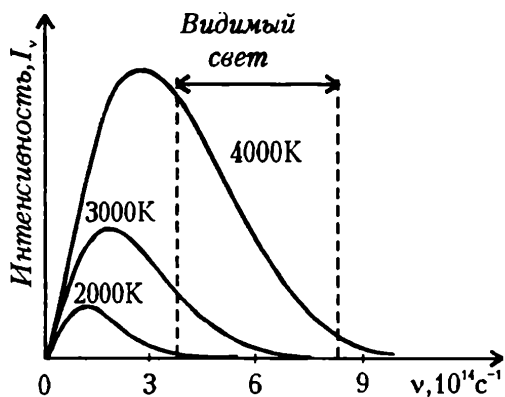
После окончания гимназии Планк решил поступить в мюнхенский университет и заняться физикой. Его отец, юрист, один из профессоров этого университета, посоветовал ему поговорить предварительно с профессором физики Филиппом фон Жолли. В публичной лекции, прочитанной в 1924 году, Планк вспоминал, как Жолли отговаривал его делать этот, по его мнению, ошибочный шаг: «Он изобразил мне физику как высокоразвитую, едва ли не полностью исчерпанную науку, которая теперь, после того как ее увенчало открытие принципа сохранения энергии, близка, по видимому, к тому, чтобы принять окончательную стабильную форму. Вероятно, в том или ином углу есть еще пылинки или пузырьки, которые можно исследовать и классифицировать, но система как целое построена довольно прочно, и теоретическая физика заметно приближается к той степени законченности, какой, например, обладает геомет-

рия уже в течение столетий». Планк не внял советам Жолли. Проучившись три года в Мюнхене, он для завершения физического образования перебрался в Берлинский университет, где преподавали знаменитые физики Гельмгольц и Кирхгоф. Однако лекции обоих ученых принесли ему мало пользы: «Гельмгольц, очевидно, никогда как следует не готовился к лекциям»... «В противоположность этому Кирхгоф читал тщательно отработанный курс... Но в целом это действовало как нечто заученное наизусть, сухое и однообразное. Мы восхищались самим лектором, а не тем, о чем он говорил». Наибольшую пользу принесли Планку самостоятельные занятия и личные контакты с выдающимися учеными.

Проблемы абсолютно черного излучения

К середине XIX века накопилось довольно много экспериментальных данных об излучении нагретых тел. Настала пора их теоретического осмысливания. Здесь два важных шага, в известном смысле противоположных, сделал Кирхгоф. Первый шаг заключался в установлении Кирхгофом, совместно с Бунзеном, того факта, что каждому веществу соответствует вполне определенный спектр – набор длин волн (или частот) света, испускаемого и поглощаемого этим веществом. Это открытие послужило основой для спектрального анализа веществ. Второй шаг состоял в нахождении таких условий, при которых спектр излучения нагретых тел зависит только от их температуры и не зависит от химического состава излучающего вещества. Кирхгоф теоретически рассмотрел излучение внутри замкнутой полости в твердом теле, стенки которой обладают определенной температурой. В такой полости устанавливается равновесие между излучением и стенками – стенки излучают столько же энергии, сколько поглощают. Оказалось, что в этих условиях распределение энергии в спектре излучения не зависит от материала, из которого изготовлены стенки. Такое излучение было названо абсолютно черным. Сначала черное излучение было как бы «вещью в себе». Но вскоре Луммер предложил для экспериментальной проверки теории Кирхгофа сделать маленькое отверстие в стенке полого шара (диаметр отверстия должен быть мал по сравнению с диаметром шара) и исследовать спектр излучения, выходящего через это отверстие. Любой световой луч, падающий на

отверстие снаружи, испытает внутри полости многократные отражения и практически не сможет выйти через отверстие наружу. (Вспомните, как в яркий солнечный день открытое окно в доме кажется снаружи черным, хотя оно освещается солнцем.) Вместе с тем при высо-



кой температуре стенок отверстие будет ярко светиться за счет света, идущего изнутри полости. Так что отверстие ведет себя как абсолютно черное тело, и выходящее из него излучение называется абсолютно черным.

На рисунке изображено распределение энергии в спектре абсолютно черного излучения. По оси абсцисс отложена частота ν , а по оси ординат – интенсивность излучения I_ν ¹. Как видно из рисунка, спектр имеет непрерывный характер, и при каждой температуре максимум интенсивности приходится на определенную частоту.

Но вернемся к теории черного излучения. Общие термодинамические соображения позволили Кирхгофу, Больцману и Вину вывести строгим путем ряд важных законов, управляющих излучением нагретых тел. Однако эти общие соображения оказались недостаточными для вывода конкретного вида закона распределения энергии в спектре абсолютно черного излучения. В этом направлении больше всех продвинулся Вин. В 1893 году он доказал, что интенсивность излучения I_ν при данной частоте может зависеть от температуры только как от параметра, входящего в отношение ν/T . Иными словами, I_ν должно зависеть от некоторой функции $f(\nu/T)$. Конкретный вид этой функции оставался неизвестным.

Планк приступает к решению проблемы черного излучения

Планк начал исследование проблемы черного излучения в 1894 году, уже имея большой опыт физика-теоретика. Он

¹ Интенсивность излучения – это энергия, приходящаяся на единичный интервал частот.

много занимался уточнением формулировок основных законов термодинамики, добиваясь большой строгости и тем самым оттачивая строгость своего мышления. Вместе с тем, как мы увидим ниже, совершая свой главный научный подвиг, он вынужден был поступиться этой строгостью, что создало дополнительные трудности.

Планк начал с попытки построить теорию черного излучения на основе электродинамики Максвелла, рассматривая излучающее тело как совокупность осцилляторов, испускающих и поглощающих электромагнитные волны.² Он показал, что интенсивность излучения I_ν пропорциональна энергии E_ν осциллятора, испускающего излучение данной частоты. Этот результат дал возможность перейти от рассмотрения черного излучения к анализу свойств осцилляторов, представлявших более привычные объекты для физиков того времени.

В 1896 году Вин, используя, по его словам, «счастливую идею» русского физика В.А.Михельсона, полуэмпирическим путем получил формулу, связывающую интенсивность излучения с частотой и температурой излучателя:

$$I_\nu = a\nu^3 e^{-b\nu/T}$$

(a , b – некоторые константы). Эта формула (ее называли формулой Вина) оказалась в хорошем согласии с экспериментальными данными в области больших значений отношения ν/T . Однако вскоре были получены экспериментальные данные в области малых значений ν/T (инфракрасная часть спектра, высокие температуры), которые явно противоречили формуле Вина.

Стало ясно, что формула Вина нуждается в существенном улучшении, и Планк взялся за эту задачу. Решить ее ему удалось весьма нестрогим путем. Полученный результат Планк изложил в докладе «Об одном улучшении закона излучения Вина», сделанном на заседании Немецкого физического общества 19 октября 1900 года. Здесь впервые появилась знамени-

² Осциллятор – это колебательная система, в которой могут возбуждаться свободные колебания. Например, шарик на пружине, прикрепленной к опоре. Электрический колебательный контур – тоже пример осциллятора.

Планк считал, что испускание атомами электромагнитных волн происходит вследствие колебаний внутриатомных электрических токов. При это атом уподоблялся микроскопическому вибратору Герца.

тая формула Планка:

$$I_{\nu} = \frac{av^3}{e^{bv/T} - 1}. \quad (1)$$

В «Научной автобиографии», опубликованной в 1955 году, Планк вспоминает: «На следующий день (после доклада) утром меня разыскал мой коллега Рубенс и рассказал мне, что после закрытия заседания в ту же ночь моя формула была аккуратно сравнена с данными его измерений и повсюду было найдено удовлетворительное совпадение. Было найдено совпадение также и с данными Луммера и Прингсхейма... Более поздние измерения все снова и снова подтверждали формулу для излучения и притом тем точнее, чем к более тонким методам измерений переходили».

Научный подвиг Планка

Планк отнюдь не был удовлетворен одержанной победой. В той же автобиографии он пишет: «Однако даже если формулу для излучения предполагать справедливой с абсолютной точностью, то все же она имеет только формальный смысл удачно угаданного закона».

Для ума, воспитанного на термодинамических исследованиях, такое положение было нетерпимым. В речи, произнесенной при получении Нобелевской премии в 1920 году, Планк говорит: «Поэтому я со дня ее (формулы) нахождения был занят задачей установления ее истинного физического смысла, и этот вопрос привел меня ... к больцмановскому образу мыслей. После нескольких недель напряженнейшей в моей жизни работы темнота рассеялась и наметились новые, неподозреваемые раньше дали».

Полученные результаты Планк доложил 14 декабря 1900 года. Это день следует считать днем рождения кванта, хотя в докладе Планка отсутствует соответствующий термин. В докладе Планк ссылаясь на большой мемуар 1877 года, в котором Больцман для построения кинетической теории газов воспользовался методами теории вероятностей. Планк решил применить теорию вероятностей к вопросу о распределении по энергиям осцилляторов, а потом перейти к распределению интенсивности в спектре абсолютно черного излучения. Все попытки Планка провести этот вывод в рамках классической физики оказались безуспешными. В поисках вывода из создавшегося положения Планк пришел к использованию при-

ема, примененного Больцманом в качестве промежуточного этапа вероятностных вычислений.

Больцман в указанном мемуаре ввел, как он писал, «полезную фикцию», заключающуюся в предположении, что кинетическая энергия молекул может иметь только дискретный ряд значений, кратных одной и той же величине ϵ . Он выписал арифметическую прогрессию значений энергии молекул:

$$0, \epsilon, 2\epsilon, 3\epsilon, \dots, n\epsilon.$$

Проведя соответствующие выкладки, Больцман перешел затем к пределу, устремляя ϵ к нулю, а n к бесконечности, так как на самом деле кинетическая энергия молекул образует непрерывный ряд значений. Таким образом, дискретность значений кинетической энергии молекул была просто промежуточным вычислительным приемом, лишенным физического смысла. Несмотря на формальный характер примененного Больцманом приема, он, очевидно, сыграл существенную роль в становлении взглядов Планка, предположившего, что энергия осцилляторов также образует дискретный ряд значений, кратных одной и той же величине. Попытки устремить эту величину к нулю не дали желаемого результата, т.е. не привели к получению формулы (1). Тогда Планк отказался от этих попыток. В письме к известному американскому физiku Вуду Планк писал: «Коротко и сжато я могу все это дело назвать актом отчаяния. Потому что по природе я миролюбив и не расположен к рискованным приключениям. Но я тогда уже 6 лет (с 1894 г.) бился над проблемой равновесия между излучением и материей, не достигнув никакого успеха; я знал, что эта проблема имеет фундаментальное значение для физики, и я знал формулу, которая воспроизводит распределение энергии в нормальном спектре; теоретическое объяснение должно было быть найдено любой ценой, и никакая цена не была бы слишком высока». И Планк заплатил эту цену, введя в физику совершенно новое представление о дискретности возможных значений энергии осцилляторов уже не как промежуточный этап, обусловленный удобствами вычислений, а как существенный элемент всего рассмотрения проблемы. Тем самым нарушался основной принцип классической физики, согласно которому физические величины всегда изменяются непрерывным образом. Все верили в справедливость изречения Аристотеля: «Природа не делает скачков».

Учитывая ограничения, указанные Вином для вида зависимости $I_\nu(T)$, Планк вынужден был предположить, что

порции энергии осциллятора должны быть пропорциональными частоте:

$$\varepsilon = h\nu. \quad (2)$$

Так в физику вошла новая фундаментальная постоянная h – постоянная Планка. Величина ε позднее была названа квантом энергий. Используя условие (2), Планк получил выражение для энергии осциллятора E_ν , а затем перешел к интенсивности излучения:

$$I_\nu = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2 \left(e^{h\nu/kT} - 1 \right)}, \quad (1')$$

где c – скорость света, k – постоянная Больцмана.

Планк неоднократно говорил об «извилистом» пути, который ему пришлось пройти. Действительно, ведь речь шла о выводе формулы (1'), представляющей улучшение формулы Вина. Это удалось сделать за счет введения квантования энергии. Но формула Вина расходилась с опытом в области малых частот, где ε мало и квантование мало существенно. В области больших частот, где ε велико и дискретность значений энергии осцилляторов существенна, формула Вина давала хорошее совпадение с опытом. В чем же дело? Обычно пишут, что Вин *вывел* свою формулу из классических представлений. Это неточно. Вин, по существу, *угадал* свою формулу.

Появление единицы в знаменателе формулы Планка обеспечивало совпадение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными и в области малых частот. Вместе с тем, в этой единице был заложен зародыш новой отрасли техники – квантовой электроники, т.е. была заложена возможность создания мазеров и лазеров. Но это, как говорится, уже другая история.

Как ни важна формула Планка, но идея квантования, использованная в процессе ее вывода, и введение новой фундаментальной константы оказались еще важнее. Это была настоящая революция в физике, имевшая такие последствия, как создание квантовой теории вещества и излучения. Наличие в физической формуле величины h означает, что эта формула может быть получена только из квантовых представлений.

Путь, приведший Планка к полной победе, был, по существу, нелогичным: пропорциональность интенсивности излу-

чения I_ν энергии осциллятора E_ν была установлена им на основе представлений чисто классической физики, а выражение для E_ν было получено из квантовых представлений. Но эта «нелогичность» отнюдь не снижает заслуг Планка. Здесь явно сказалась его интуиция великого естествоиспытателя. Такая же ситуация повторилась при создании Бором модели атома. Только значительно позднее трудами ряда ученых была создана логичная квантовая теория, но при этом выявились новые проблемы. Пользуясь терминологией Достоевского – человечеству не угрожает «скука».

В заключение – несколько слов, характеризующих некоторые черты облика Планка как человека и его взгляды.

Наряду с занятиями физикой Планк всю жизнь увлекался музыкой. Одно время, в юности, он даже колебался в выборе между физикой и музыкой. Планк был незаурядным пианистом, дирижировал академическим хором и играл на органе. Он часто музицировал с Эйнштейном, игравшим на скрипке. До глубокой старости Планк занимался туризмом и альпинизмом. Есть фотография 84-летнего Планка на трехтысячнике в Восточном Тироле. В его натуре было стремление к преодолению препятствий, хотя в обычной жизни он был скромным, приветливым и сдержанным человеком. Планк испытал в своей жизни тяжелые утраты. В войне 1914 года под Верденом был смертельно ранен его старший сын; во времена фашизма его второй сын был казнен за участие в офицерском заговоре против Гитлера.

Научные идеи Планка получили всеобщее признание и принесли ему мировую славу. Он был избран членом академий наук практически всех стран, в том числе и Академии наук СССР.

Умер Макс Планк в 1947 году в возрасте 89 лет. Имя его навсегда вошло в историю науки.

В очень полезной научно-популярной книжке Б.В.Булюбаша и В.З.Гуревича «Электричество и тепло» (М.: Наука, 1978) приведен следующий курьезный случай.

В одном из центральных городов России в начале XX века владельцы электростанции поймали с поличным некоего Иванова, украдкой подключившегося к электросети и освещавшего квартиру. Компания подала на него в суд, обвиняя в хищении принадлежащих ей ценностей. Однако суд оправдал злоумышленника, сославшись на действующее «Уложение о наказаниях». Согласно статье этого документа, похищенной могла быть только вещь, имеющая массу и определенные размеры. Сенат, который вторично рассматривал жалобу компании, определил, что электрическая энергия может рассматриваться как «движимое имущество, хотя и не является вещью».

Более хитроумный случай описан в научной монографии немецкого ученого П.Грассмана «Вопросы термодинамического анализа» (М.: Мир, 1965).

В пивоварне охлаждали один из отдаленных погребов посредством центральной холодильной установки. Трубопровод с рассолом проложили через погреб одного торговца. Вскоре владелец пивоварни обнаружил, что торговец использует рассол для охлаждения своего погреба, и обвинил его в краже. Однако судья заявил: «В соот-



Опубликовано в
«Кванте» №8 за 1983 год.



ветствии со статьей 242 Уголовного кодекса, кража есть противозаконное присвоение чужого имущества. В данном случае нет состава преступления, так как торговец не присваивал себе рассол, а возвращал его обратно в трубопровод пивоварни».

Тогда владелец пивоварни обратился в следующую инстанцию и подтвердил свою точку зрения таким аргумен-

том: «Речь идет не о краже рассола, а о краже энергии. Если я буду охлаждать погреб торговца, я должен потреблять больше электроэнергии для холодильной машины». Возражение нового судьи физически было обосновано только наполовину: «Рассол ведь получил тепло, т.е. энергию из погреба торговца, следовательно, у Вас энергию не украли, а, наоборот, Вы получили энергию в подарок».

Мы все догадываемся, что судья был неправ, но далеко не каждый сразу скажет, в чем его ошибка.

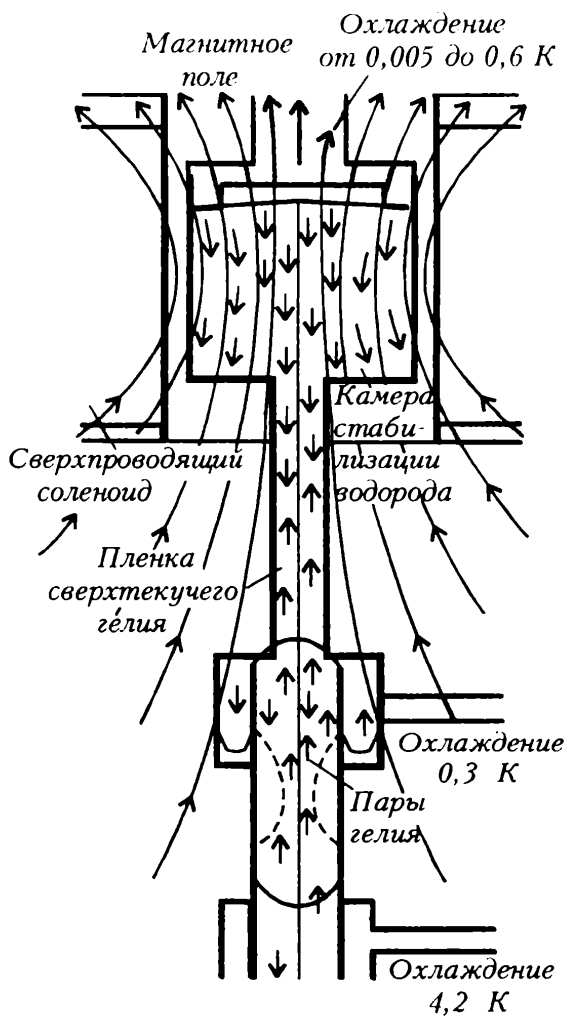
До сих пор считалось, что существует единственное вещество, в котором квантовые свойства проявляются не только в микроскопических, но и в макроскопических масштабах. Это жидкий гелий при низких температурах. Он не обладает вязкостью (сверхтекучесть) и при нормальном давлении не отвердевает при самом сильном охлаждении, вплоть до абсолютного нуля (при сжатии гелий замерзает).

Недавно сотрудниками Амстердамского университета получено еще одно квантовое вещество – одноатомный водород. По предсказаниям теории, это вещество должно обладать еще более уникальными свойствами – атомарный водород останется газообразным даже при абсолютном нуле температур.

Как известно, водород в обычных условиях представляет собой газ, состоящий из двухатомных молекул H_2 . Энергия взаимодействия атомов в этих молекулах равна $7,7 \cdot 10^{-19}$ Дж (4,8 эВ). Чтобы вызвать почти полную диссоциацию водорода на отдельные атомы, необходимо нагревание до температуры, превышающей 5000 °С. Но при охлаждении газа происходит чрезвычайно быстрая рекомбинация молекул, сопровождающаяся выделением большого количества теплоты. Процесс носит взрывной характер.

Физикам из Амстердама удалось найти способ замедлить рекомбинацию и получить стабилизированный при низкой температуре одноатомный водород, живущий длительное время – порядка нескольких часов. С этой целью был применен очень изящный метод, основанный на использовании принципа Паули. Попробуем это пояснить.

В двухатомной молекуле H_2 оба электрона имеют наибольшую вероятность находиться между двумя атомными ядрами (электростатическое притяжение электронов и ядер как бы «цементирует» молекулу). Согласно принципу Паули, два электрона, входящие в одну физическую систему, не могут



одновременно находиться в одном и том же состоянии. В квантовой механике состояние частицы определяется ее энергией, положением или импульсом и спином. В молекуле водорода, где энергии и импульсы у двух электронов одинаковы, спины электронов должны иметь противоположные направления. Другими словами, сближение двух атомов водорода приводит к образованию устойчивой молекулы только в случае антипараллельных электронных спинов. Значит, если создать одноатомный водород, у атомов которого все электронные спины параллельны друг другу, то в таком газе не будет происходить образование молекул H_2 .

Эта простая идея и лежала в основе опытов по стабилизации одноатомного водорода. Однако не следует думать, что

реализация этой идеи также была простой. Прежде всего надо было ослабить вредное влияние межатомных столкновений, приводящих к хаотическим поворотам электронных спинов. Поэтому работа проводилась при температурах порядка десятых долей кельвина. Кроме того, надо было устранить прилипание атомов к стенкам экспериментального сосуда, где они рекомбинируют в молекулы. Для этого применялась «смазка» сверхтекучим гелием, который притягивает атомы водорода очень слабо и поэтому может предотвратить их скопление у стенок.

На рисунке изображена центральная часть экспериментальной установки для получения стабилизированного атомарного водорода, созданной в Амстердамском университете. Сначала с помощью электрического разряда двухатомный водород диссоциировал на отдельные атомы. Затем при помощи сильного неоднородного магнитного поля, создаваемого соленоидом со сверхпроводящей обмоткой, атомы с параллельными электронными спинами собирались в специальной ловушке.

Измерения показали, что концентрация атомов достигала 10^{23} м^{-3} и оставалась на этом уровне в течение двух-трех часов. Если удастся повысить концентрацию, то можно будет наблюдать макроскопические свойства одноатомного водорода.

За последние двадцать пять лет произошло быстрое развитие нового раздела физической науки – нелинейной оптики. Справедливости ради надо сказать, что еще в двадцатых годах нашего столетия С.И.Вавилов упорно искал нелинейные оптические эффекты. Результатом этих исследований стала работа С.И.Вавилова и В.Л.Лёвшина 1926 года, в которой впервые наблюдался нелинейный оптический эффект – уменьшение коэффициента поглощения уранового стекла при прохождении через него света от яркой искры. В честь этой пионерской работы, по предложению академика Р.В.Хохлова, советские конференции, посвященные нелинейной оптике, называются вавиловскими. Создание в 1960 году лазеров вызвало буквально взрыв работ по нелинейной оптике.

Прежде чем перейти к рассказу о некоторых нелинейных оптических явлениях, напомним основные положения линейной оптики, которые, несмотря на свою привычность, в действительности далеко не тривиальны.

«Несовершенство опыта способствует развитию науки»

Одним из основополагающих принципов, лежащих в основе линейной оптики, служит принцип суперпозиции, согласно которому при прохождении одной световой волны сквозь другую обе распространяются не взаимодействуя друг с другом. Правда, часто говорят, что при интерференции темная полоса образуется там, где одна из интерферирующих волн «гасит» другую. Это, однако, не означает, что волны взаимодействуют друг с другом. Здесь просто происходит векторное сложение противоположно направленных электрических полей обеих волн. При взаимодействии же

волн должны были бы измениться под влиянием друг на друга сами эти электрические поля, что при интерференции не имеет места.

Дальше мы увидим, что в действительности взаимодействие волн должно быть всегда, однако результаты его заметны лишь при определенных условиях. Прежде всего — когда интенсивности¹ взаимодействующих волн велики. Это условие и определяло направление поисков. Так, С.И. Вавилов пытался обнаружить нарушение принципа суперпозиции в солнечной короне, где он надеялся найти следы рассеяния света на свете. Однако эти исследования завершились безрезультатно. Заметим, что если бы рассеяние света на свете происходило при обычных (для земных условий) интенсивностях света, то для человека это имело бы весьма неприятные последствия: ведь видимый мир был бы затянут, как туманом, световой пеленой.

Другой важной основой линейной оптики служит принцип неизменности частоты света при прохождении его сквозь различные среды. Он был открыт Ньютоном в процессе его замечательных оптических экспериментов. В 1671 году на их основании Ньютон сформулировал следующее положение: «Вид цвета, свойственный каждому отдельному сорту лучей, не изменяется ни преломлением, ни отражением от естественных тел, ни какой-либо другой причиной, которую я мог наблюдать».

Счастливым для развития физики оказалось то обстоятельство, что экспериментальные возможности Ньютона, в смысле интенсивности источников света, были весьма ограничены (солнечный луч, прошедший сквозь щель в оконной ставне). Если бы у него в руках оказался лазер, то наблюдаемая картина могла бы сильно осложниться, что задержало бы развитие оптики. В связи с опытами Ньютона С.И. Вавилов подчеркивал: «Несовершенство опыта способствует развитию науки». Это утверждение звучит парадоксально, но преждевременное обнаружение некоторых деталей в эксперименте может задержать на долгие годы истолкование экспериментальных данных и развитие теории.

¹ Интенсивность волны — это энергия, проходящая через единицу площади волнового фронта за единицу времени. Величина интенсивности пропорциональна квадрату амплитуды волны.

Практически все нелинейные эффекты наблюдаются при распространении света в веществе. В принципе, теория предсказывает возможность их наблюдения и в вакууме, однако до сих пор там они обнаружены не были.

В классической оптике при объяснении процесса распространения света в среде используют модель атома как системы, в которой электрон как бы закреплен на пружине. Проходящая световая волна вызывает своим электрическим полем вынужденные колебания электрона. Эти колебания в свою очередь порождают в окружающем атом пространстве электромагнитные волны, т.е. сам атом начинает излучать. Возникающая вторичная волна по частоте совпадает с первичной волной (при вынужденных колебаниях частота колебаний совпадает с частотой вынуждающей силы). При этом разность фаз этих волн остается постоянной (такие волны называются когерентными). Сложение всех вторичных волн, излучаемых различными атомами, с первичной дает результирующую волну, распространяющуюся в среде со скоростью v , отличной от скорости c распространения света в вакууме. Это и приводит к тому, что показатель преломления среды $n = c/v$ оказывается отличным от единицы.

Смещения электрона, вызванные световой волной от обычного источника света, весьма малы. Они определяются соотношением напряженностей электрического поля световой волны и внутриатомного поля. В волнах от обычных источников света напряженность поля не превышает 10^3 В/см. Напряженность же внутриатомного поля порядка 10^9 В/см. Таким образом, при воздействии поля световой волны смещение электрона не превышает 10^{-6} от радиуса атома, что составляет 10^{-14} см — величину порядка процентов от радиуса атомного ядра!

В лазерных пучках напряженности поля достигают $10^6 - 10^7$ В/см, и, соответственно, смещения могут быть гораздо большими.

При малых относительных смещениях электрона можно считать, что действующая на электрон возвращающая сила выражается законом $F = -kx$, т.е. имеет место линейная зависимость силы F от смещения x (закон Гука для обычной пружинки). Однако с ростом величины смещений (например, в поле лазерного пучка) должны проявиться отклонения от этого закона. В простейшем случае, который будет рассмотрен

ниже, отклонение от линейной зависимости можно принять в виде $F = -kx + \alpha x^2$, где нелинейное слагаемое αx^2 сказывается лишь при достаточно больших смещениях (квадрат малой величины мал по сравнению с самой величиной). Заметим, что теперь величина силы асимметрично изменяется при изменении знака смещения (рис. 1).

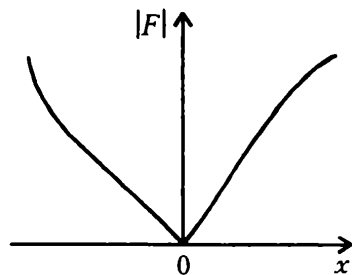


Рис. 1

В одну сторону электрон, оказывается, сместить легче, чем в другую (например, при $\alpha > 0$ в сторону положительных x легче, чем в сторону отрицательных).

Итак, можно сказать, что приближение линейной оптики соответствует выбору простой линейной зависимости возвращающей силы, действующей на электрон, от смещения. Мир нелинейной оптики начинается там, где становятся существенными отклонения от этого простого закона и следует принимать во внимание реальный нелинейный характер этой зависимости.

В линейной оптике оптические характеристики вещества (например, показатель преломления) зависят только от свойств самой среды и частоты проходящего через нее света, однако на них не влияет его интенсивность. Если же интенсивность проходящей через среду световой волны оказывается столь большой, что нелинейность возвращающей силы не учитывать уже нельзя, то свойства среды начинают сами зависеть от интенсивности проходящей волны. К чему это приводит, вы сейчас увидите.

Генерация гармоник

Рассмотрим простейший случай, о котором уже шла речь выше. Уравнение движения электрона будет иметь вид

$$ma = -kx + \alpha x^2 + eE_0 \cos \omega t, \quad (1)$$

где m — масса электрона, $a = x''$ — его ускорение, а $eE_0 \cos \omega t$ — сила, действующая на электрон со стороны электрического поля световой волны (E_0 — амплитуда поля, ω — частота). Задача состоит в том, чтобы найти из этого уравнения зависимость $x(t)$ и на ее основании уже судить о свойствах вторичных волн в рассматриваемой среде. К сожалению,

математика не дает нам точных методов решения подобных нелинейных уравнений.

Замечательный английский физик Рэлей, занимавшийся теорией колебаний, предложил приближенный метод решения задачи, обладающий большой эффективностью. Так как нелинейное слагаемое αx^2 проявляет себя лишь при достаточно больших x , Рэлей в качестве нулевого приближения пренебрег членом αx^2 . После этого осталось линейное уравнение

$$ma = -kx + eE_0 \cos \omega t,$$

такое же, как уравнение вынужденных колебаний грузика на пружинке под действием периодической внешней силы. Понятно, что в этом случае движение будет происходить по гармоническому закону, но не с собственной частотой $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, а с частотой ω вынуждающей силы:

$$x_0(t) = beE_0 \cos(\omega t + \varphi),$$

где beE_0 – амплитуда вынужденных колебаний грузика (для удобства рассмотрения в амплитуде выделен сомножитель eE_0), а φ – сдвиг фазы этого колебания по сравнению с фазой вынуждающей силы.

Для получения следующего приближения Рэлей в уравнении (1) заменил в нелинейном слагаемом величину $x^2(t)$ найденной приближенной величиной $x_0^2(t)$. В результате уравнение (1) из нелинейного превращается в линейное (x в него входит только в первой степени):

$$ma = -kx + \alpha b^2 e^2 E_0^2 \cos^2 \omega t + eE_0 \cos \omega t. \quad (2)$$

Воспользовавшись известным тригонометрическим соотношением

$$\cos^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\omega t),$$

получаем окончательно

$$ma = -kx + \left(\frac{1}{2} \alpha b^2 e^2 E_0^2 + \frac{1}{2} \alpha b^2 e^2 E_0^2 \cos 2\omega t + eE_0 \cos \omega t \right).$$

Из этого уравнения движения мы видим, что на электрон как бы действуют три вынуждающие силы (слагаемые, заключенные в скобки). Первая из них, не зависящая от времени,

вызовет просто постоянное смещение вектора из положения равновесия (асимметрия, о которой мы уже упоминали выше). Вторая сила, изменяющаяся с частотой 2ω , вызывает появление в смещении электрона составляющей, изменяющейся с той же частотой 2ω . Подчеркнем, что амплитуда этой составляющей пропорциональна квадрату амплитуды световой волны. Наконец, последняя сила, изменяющаяся с частотой ω , нам уже знакома. Она соответствует полю падающей световой волны, благодаря которому и возникают вторичные волны. Амплитуда этой составляющей пропорциональна амплитуде падающей световой волны. С ростом интенсивности световой волны роль второй силы по отношению к третьей увеличивается (квадрат большой величины велик по сравнению с самой величиной).

Таким образом, вынужденные колебания электрона будут состоять из двух гармонических колебаний с частотами ω и 2ω . Соответственно, и вторичные волны, испускаемые атомами (ионами) кристалла, будут состоять из волн с той же частотой ω , что и первичная волна, а также из волн с удвоенной частотой. Получается, что из-за нелинейного слагаемого αx^2 в действующей на электрон возвращающей силе в кристалле возникает вторичная волна с удвоенной частотой (ее называют второй гармоникой), и тем самым нарушается принцип постоянства частоты, царивший в линейной оптике.

С помощью нелинейных эффектов можно преобразовать частоту светового луча, не нарушая его направленности. Это крайне важно для практики, особенно в лазерной технике. Например, лазер на неодимовом стекле дает мощное, но невидимое инфракрасное излучение с длиной волны 1064 нм. Если удвоить его частоту, длина волны станет в два раза короче — 532 нм, что соответствует зеленому свету, прекрасно видимому глазом человека.

В радиотехнике нелинейный эффект преобразования частоты наблюдался задолго до появления нелинейной оптики. Когда в Москве была построена мощная радиостанция, то при приеме в Горьком передач радиостанций, находящихся в городах к западу

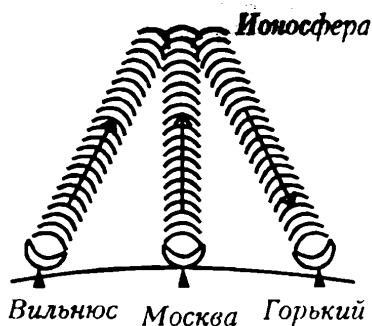


Рис. 2

от Москвы, стали прослушиваться и московские передачи (рис.2). Это объясняется тем, что мощные волны московской радиостанции изменяют ионосферу над Москвой и тем самым модулируют проходящие радиоволны, принимаемые в Горьком.

Условие синхронизма

И все же не следует думать, что преобразование частоты света с высоким коэффициентом полезного действия (КПД) представляет собой простую задачу. Так, в работе Франкена с сотрудниками, опубликованной в 1961 году и содержащей описание первых наблюдений удвоения частоты света, КПД (т.е. отношение интенсивности выходящей волны с частотой 2ω к интенсивности падающей волны с частотой ω) составлял всего лишь 10^{-10} ! В этих опытах красный свет рубинового лазера с длиной волны 0,6943 мкм превращался в ультрафиолетовое излучение с длиной волны 0,3471 мкм (напомним, что длина волны обратно пропорциональна ее частоте). В качестве кристаллической нелинейной среды был использован кварц.

Для того чтобы эффект генерации гармоник проявился в полной мере, необходимо, чтобы фазы вторичных волн на выходе из кристалла были согласованы (условие волнового синхронизма). Только в этом случае сложение вторичных волн дает интенсивную результирующую волну. Атомы же распределены по всей длине кристалла, сквозь который проходит свет. Поэтому генерируемые ими вторичные волны

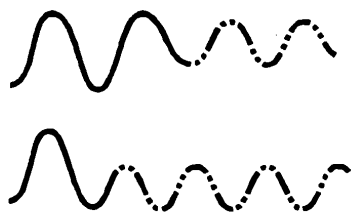


Рис. 3

будут иметь различные начальные фазы (рис.3). Чем дальше от источника находится атом, тем позднее до него дойдет первичная волна и тем позже сам он начнет излучать вторичную. С другой стороны, этот, более далекий от источника, атом окажется ближе к приемнику. Следовательно, его вто-

ричной волне придется пройти меньший путь, чем волне, испущенной более близким к источнику света атомом.

В линейной оптике первичная и вторичная волны имеют одинаковые частоты, а следовательно, и одинаковые скорости распространения в среде. Поэтому в таком случае не важно, где произошло преобразование первичной волны во вторичную – все они приходят к приемнику с одной и той же фазой.

Иначе обстоит дело в нелинейной оптике. Показатель преломления среды зависит от частоты (дисперсия), поэтому вторичная волна с частотой 2ω распространяется, вообще говоря, уже с другой скоростью, чем первичная (частота которой ω). Поэтому фаза, с которой вторичная волна приходит к приемнику, существенно зависит от того, на каком расстоянии от источника произошло преобразование частоты. Понятно, что наибольшая интенсивность результирующей вторичной волны будет достигнута в том случае, если все вторичные волны от отдельных атомов придут к приемнику с одинаковыми фазами. Этого можно добиться подбором среды, у которой показатели преломления окажутся одинаковыми для волн с частотами ω и 2ω .

Так, обеспечив выполнение условия волнового синхронизма, в кристаллах KN_2PO_4 удастся удваивать частоту световой волны с КПД, превышающим 90%!

«Квантовые» нелинейные эффекты

До сих пор, рассматривая оптические нелинейные явления, мы не выходили за рамки представлений классической физики. Однако есть ряд нелинейных эффектов, которые объяснимы только на языке квантовой физики.

Например, в настоящее время широкое применение в лазерной технике нашло резкое просветление, т.е. уменьшение коэффициента поглощения некоторых растворов (крипто- и фталоцианина в бензоле) при прохождении через них мощных световых пучков. Кювета с таким раствором представляет как бы автоматический затвор, пропускающий мощный световой пучок и задерживающий слабые. Попробуем разобраться в этом явлении.

Согласно квантовым представлениям, атом может обладать только определенными запасами энергии – находиться на определенных энергетических уровнях. Атом (или молекула) может поглощать свет с частотой ν , удовлетворяющей условию Бора:

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (3)$$

где h – постоянная Планка, а E_1 и E_2 – энергии атома на двух уровнях. При этом атом переходит с уровня E_1 на уровень E_2 . Очень важно, что возбужденный атом (или молекула), поглотивший энергию фотона $h\nu$, задерживается на верхнем энергетическом уровне конечное время. У молекулы фталоциани-

на оно в масштабах атомного мира огромно – порядка 10^{-3} с. Коэффициент поглощения среды пропорционален, естественно, числу «голодных» молекул, находящихся на нижнем энергетическом уровне E_1 , ибо только они способны поглощать фотоны с частотой, удовлетворяющей условию (3). Но при прохождении мощного светового пучка произойдет большое число актов поглощения фотонов веществом, при которых многие молекулы перейдут в разряд «сытых», поднявшись на уровень E_2 , где и застрянут на время порядка 10^{-3} с. Это приведет к заметному уменьшению числа «голодных» молекул, находящихся на нижнем уровне E_1 . Коэффициент поглощения резко уменьшится. Мощный световой пучок как бы пробивает себе путь в поглощающей среде.

Остановимся немного на многофотонных процессах, когда квантовая «разборчивость в еде» атомов и молекул ослабляется. Оказывается, что в мощных световых пучках среда начинает поглощать излучение самых различных частот. Объясняется это тем, что условие Бора учитывает возможность поглощения атомом лишь одного фотона, чему соответствует выражение (3). При учете возможности многофотонных процессов поглощения атомом или молекулой порция энергии должна быть равна разности энергий между какими-либо двумя уровнями, а уж сколько фотонов при этом поглотится – это дело хозяйское.

В обычных условиях, при малых интенсивностях световых пучков, плотность фотонов невелика, а вероятность одновременного поглощения двух или нескольких фотонов мала. Однако боровское условие (3) в общем случае следует записать в виде

$$h\nu_1 + h\nu_2 + \dots = E_2 - E_1.$$

Это приводит к эффекту, обратному описанному выше просветлению среды. В случае мощных пучков среда начинает поглощать свет с теми частотами, для которых она была прозрачна при малых интенсивностях.

Интересно, что в мощных лазерных пучках за счет многофотонных процессов фотоэффект теряет свой квантовый характер. Известное уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

где A – работа вывода, $mv^2/2$ – кинетическая энергия вырван-

ного светом электрона, заменяется уравнением

$$Nh\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \quad (4)$$

где N – число фотонов, поглощаемых электроном одновременно. Из уравнения (4) следует, что с ростом N (интенсивности света) должна расти и кинетическая энергия вырванных электронов. Кроме того, красная граница фотоэффекта сме-

щается в область малых частот ($\nu_{\text{кр}} = \frac{A}{hN}$).

Характерно, что в работе Эйнштейна 1905 года, удостоенной Нобелевской премии и содержащей вывод основного уравнения теории фотоэффекта, имеется весьма существенное замечание: «Простейшим будет случай, когда один световой квант (фотон) отдает всю свою энергию одному электрону; мы и будем предполагать, что это и происходит в действительности». Это было вполне законно до появления лазеров, и многочисленные эксперименты подтверждали справедливость уравнения Эйнштейна. В данном случае опять-таки была полезна ограниченность возможностей эксперимента (в смысле интенсивности света). Она способствовала укреплению позиций квантовой теории. Когда эта теория развилась и окрепла, ей стали по плечу и более сложные эффекты нелинейной оптики, наблюдаемые в мощных лазерных пучках.

Я рассматриваю труды Бора как величайший триумф человеческой мысли.

Э.Резерфорд, 1936 г.

Слова Резерфорда, приведенные в качестве эпиграфа, сказаны им уже после того, как на смену боровской теории атома пришла стройная квантовая механика. Ни в коем случае не умаляя заслуги создателей квантовой механики Гейзенберга, Шредингера и Дирака, Резерфорд справедливо делает акцент на роли Нильса Бора. Дирак, в значительной мере завершивший построение квантовой механики и заложивший основы квантовой электродинамики, так оценивал роль Бора в лекции, прочитанной им в 1975 году: «Я считаю, что появление идей Бора было самым грандиозным шагом в истории развития квантовой механики».

Надо сказать, что роль Бора была весьма своеобразной. Наибольшую известность получила так называемая модель атома Бора, хотя сам Бор относился к этой модели довольно скептически, понимая ее противоречивость. Гораздо более важными были те фундаментальные идеи, которые имел в виду Дирак.

Велики заслуги Бора и как учителя большой плеяды крупных ученых (в том числе выдающегося советского физика Ландау). Это связано не только с масштабами его научного гения, но и с поразительными душевными качествами. Он был человеком исключительной доброты, чистоты и обаяния. К Бору приезжали и молодые, и уже сложившиеся ученые. Он вел с ними поистине изнурительные дискуссии, приводившие к весьма важным новым результатам. Сбылись слова, сказанные о Боре, когда он был еще мальчиком, его отцом: «К Нильсу будут приходить люди и слушать его».

В 1903 году Нильс Бор поступил в Копенгагенский университет, где его отец Кристиан Бор был профессором физиологии. Курс физики в этом университете читал профессор Кристиансен. Широта его интересов и своеобразный подход к предмету, безусловно, сыграли очень большую роль в формировании Нильса Бора как физика.

Интересно, что студенты очень скоро почувствовали незаурядность Нильса Бора. Одна его сокурсница в письме своей кузине, отправленном в 1904 году, писала: «Кстати о гениях. С одним из них я встречаюсь каждый день. Это Нильс Бор, о котором я уже тебе рассказывала: его незаурядные способности проявляются все в большей степени».

В 1905 году Датская Королевская академия наук объявила конкурс на лучшую работу по физике. Надо было исследовать колебания струй жидкостей с целью создания метода определения коэффициента поверхностного натяжения (речь шла о развитии работ знаменитого английского физика Рэлея). Бор весьма успешно справился с теоретическими проблемами, но эксперимент успел выполнить только с одной жидкостью – с водой. Важность теоретических результатов Бора была оценена золотой медалью, хотя его конкурент, также награжденный золотой медалью, разработал более простой экспериментальный метод и определил коэффициенты поверхностного натяжения ряда жидкостей.

Окончив в 1907 году университет, Бор обратился к Кристиансену за темой для магистерской диссертации. Тот посоветовал заняться электронной теорией металлов. Бор послушался и вскоре написал своему брату Харальду, что работы Лоренца по электронной теории его очаровали. Но очарованность не помешала Бору обнаружить принципиальные недостатки классической электронной теории. В 1909 году Бор получил степень магистра и сразу же начал работать над докторской диссертацией, явившейся продолжением его теоретических исследований.

Докторская диссертация, представленная 12 апреля 1911 года, в частности, содержала доказательство принципиальной невозможности создания теории магнитных свойств вещества на основе чисто классических представлений. Так как диссертация была опубликована только на датском языке, ее результаты не получили широкого распространения, и через восемь лет голландка ван Лёвен заново провела то же доказательство

(теорема Бора – ван Лёвен). Важно подчеркнуть, что здесь Бор впервые лично натолкнулся на границу применимости классической физики.

Защита диссертации состоялась 13 мая того же года. В еженедельнике «Политика» была помещена заметка, где кратко описывалось выступление на этой защите профессора Кристиансена: «Он говорил в своей обычной приятной манере, рассказал несколько забавных историй и выразил сожаление, что диссертация Бора не была опубликована на иностранном языке. У нас в Дании едва ли есть такие компетентные в электронной теории люди, кто бы мог судить о диссертации на эту тему». Дальше было написано: «Доктор Бор, бледный и застенчивый молодой человек, не принимал активного участия в обсуждении, побившем по своей непродолжительности все рекорды».

Кристиансен был прав, и поэтому Бор вскоре после защиты с радостью отправился в Кембридж на годичную стажировку.

Бор попадает к Резерфорду

В Кембридже работал сам «отец электрона» Дж.Дж.Томсон. Более компетентного человека в области, интересовавшей Бора, не было. Однако по ряду причин Бору не удалось наладить деловой контакт с Томсоном.

Зато в Кембридже Бор в октябре 1911 года впервые встретился с Резерфордом, приехавшим сюда из Манчестера на так называемый ежегодный кавендишский обед. Бор вспоминал: «Хотя в этот раз мне не удалось познакомиться с Резерфордом, на меня произвели глубокое впечатление его обаяние и энергия – качества, с помощью которых ему удавалось достигать почти невероятных вещей, где бы он ни работал».

В ноябре Бор поехал в Манчестер к одному из коллег своего отца. Коллега оказался близким другом Резерфорда и познакомил с ним Бора. Позднее Бор писал: «Во время беседы, в которой Резерфорд с подлинным энтузиазмом говорил о многих новых перспективах развития физики, он любезно согласился на мою просьбу о том, чтобы мне присоединиться к группе, работающей в его лаборатории, после того, как ранней весной 1912 года я должен был закончить свои занятия в Кембридже». Резерфорд только просил договориться о переезде с Джи-Джи (прозвище Томсона), чтобы

эта процедура не выглядела как результат переманивания сотрудника от одного руководителя к другому. Согласие Томсона было получено без особого труда.

Если в Кембридже Бор увлекался моделью атома Томсона, согласно которой отрицательно заряженные электроны вкраплены в облако положительного заряда, «как изюминки в кекс», то в Манчестере он быстро освоился с ядерной моделью атома Резерфорда (созданной только год тому назад), где положительный и отрицательный заряды как бы поменялись местами. В этой модели положительно заряженное ядро малых размеров окружено облаком электронов, движущихся по замкнутым орбитам вокруг ядра (как планеты вокруг Солнца). У модели Резерфорда имелся серьезный недостаток – она никак не могла объяснить устойчивость структуры атома, проявлявшуюся буквально на каждом шагу.

Бор с энтузиазмом окунулся в атмосферу манчестерской лаборатории и занялся попытками разрешения этого противоречия. Резерфорд быстро оценил глубину подхода Бора и оказывал ему всяческую поддержку. У Бора возникла идея применить к решению указанной проблемы квантовые представления, развитые Планком и Эйнштейном. Неизвестно, правда, где и когда Бор впервые познакомился с этими представлениями. (Характерная деталь – в курсе теоретической физики Кристиансена, изданном на немецком языке в 1910 году, нет ни слова о квантах!)

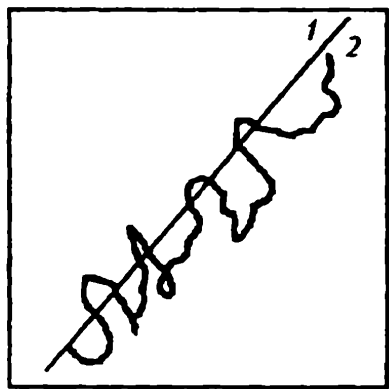
Главная работа Бора

В сентябре 1912 года Бор вернулся в Копенгаген и продолжил свои попытки применить квантовые представления к планетарной модели атома, но дело продвигалось очень туго. В первых числах февраля 1913 года к нему случайно заглянул его университетский товарищ – спектроскопист Хансен. До этой встречи Бор не проявлял никакого интереса к строению линейчатых спектров излучения и поглощения различных элементов. Позднее он говорил: «Они воспринимались так же, как прекрасные узоры на крыльях бабочек, – их красотой можно было восхищаться, но никто не думал, что регулярность в их окраске способна навести на след фундаментальных биологических законов». Хансен задал вопрос: «А как твоя теория объясняет спектральные формулы?». Бор, получивший к тому времени, как мы видели, весьма солидную подготовку в области теоретической физики, не понял, о чем идет речь. Он ничего не знал ни о каких спектральных

формулах. Хансен сказал: «Тебе необходимо посмотреть эти формулы. Они с замечательной простотой описывают атомные спектры». Бор выполнил этот совет из вежливости, не придавая ему особого значения. Однако, по его словам, как только он увидел формулу Бальмера, все немедленно прояснилось. Формула эта была подобрана Бальмером (швейцарским физиком и математиком) чисто эмпирическим путем еще в конце XIX века и выражала последовательность частот для ряда линий в видимой области спектра атома водорода. Несколько позднее аналогичные закономерности были обнаружены и для невидимых участков водородного спектра.

После знакомства с формулой Бальмера дело быстро пошло на лад, и уже в марте 1913 года Бор завершил работу, которую он назвал «О строении атомов и молекул». В том же году по представлению Резерфорда она была опубликована в английском журнале «Philosophical Magazine» в виде трех статей. Мы ограничимся рассмотрением только первой, наиболее важной из «трилогии» Бора статьи – «Связывание электронов положительным ядром».

Между фактическим ходом исследования и изложением его автором в завершающей статье часто существует разрыв.



«График» Сент-Дьёрдьи

Известный американский биохимик, нобелевский лауреат Сент-Дьёрдьи изобразил часто складывающуюся ситуацию графически (см. рисунок), где по одной оси отложено время, по другой – «истина». Ломаная 2 выражает фактический ход исследования, когда периоды роста «истины» сменяются периодами ее спада (т.е. заблуждениями), а идеальная прямая 1 изображает изложение этого же процесса в завершающем труде.

Бор, по натуре человек откровенный, не мог так поступить, хотя и переделывал свою статью многократно. Для Бора характерна также щепетильность, с которой он ссылается на своих неудачливых предшественников, пытавшихся применить квантовые представления к объяснению свойств атома.

Введение к статье содержит очень важное замечание, касающееся роли квантовой постоянной Планка в теории атома. Это замечание носит совершенно современный харак-

тер и связано с так называемой теорией размерностей. Одним из пионеров применения методов теории размерностей в физике был Рэлей (с развития трудов которого, еще студентом, начинал свою научную деятельность Бор). Если выбрана определенная система основных величин, например в механике – длина, время и масса, то размерности производных величин записываются через размерности основных величин. Так, размерность длины обозначается $[l] = L$, тогда размерность площади $[S] = L^2$ и объема $[V] = L^3$. Размерность времени $[t] = T$, соответственно, размерность скорости $[v] = LT^{-1}$, а ускорения $[a] = LT^{-2}$. Так как размерность массы $[m] = M$, то размерность силы $[F] = MLT^{-2}$. И так далее.

Бор обратил внимание на то, что в модели атома Резерфорда имеются только два параметра – заряд e и масса электрона m , из которых нельзя образовать величину, определяющую структуру атома и имеющую размерность длины. Если же добавить планковскую постоянную h , то такая возможность появляется.

Воспроизведем несложные выкладки, отсутствующие в статье Бора, которые помогут понять его идею. При этом мы, так же как это сделал Бор в последующих частях статьи, будем пользоваться так называемой абсолютной электростатической системой единиц (СГСЭ). В ней в качестве основных механических единиц приняты сантиметр, грамм и секунда (отсюда буквы СГС). Размерность заряда электрона в этой системе проще всего определить из закона Кулона (основного закона электростатики), записав его в простейшем виде $F = e^2/r^2$. Тогда $[e^2/r^2] = [F] = MLT^{-2}$, откуда $[e] = M^{1/2}L^{3/2}T^{-1}$. Размерность планковской постоянной определяется из формулы для энергии кванта $E = h\nu$. Поскольку частота ν равна единице, деленной на период колебаний, ее размерность $[\nu] = T^{-1}$. Размерность энергии легко получить из выражения для кинетической энергии $(mv^2/2)$, которое дает $[E] = ML^2T^{-2}$. Тогда размерность планковской постоянной $[h] = [E]/[\nu] = ML^2T^{-1}$.

Составим выражение $h^2/(me^2)$. Его размерность будет просто L (что легко проверить, воспользовавшись приведенными выше выкладками). Значит, это выражение характеризует некоторую длину. И действительно, если ввести множитель $1/(4\pi^2)$, т.е. заменить h на $\hbar = h/2\pi$, получим $\hbar^2/(4\pi^2)(me^2) = \hbar^2/(me^2)$ – величину, равную радиусу атома водорода. Справедливости ради отметим, что метод размер-

ностей не может дать никаких сведений о численных множителях типа $1/(4\pi^2)$.

Теперь об основном содержании статьи. Планк считал частоту излучения, испускаемого атомом, равной частоте колебаний электрона, рассматриваемого как линейный осциллятор (модель — электрон на пружинке). В планетарной модели атома аналогом этой частоты должна служить частота обращения электрона по орбите. Однако в действительности с частотой излучения дело обстоит гораздо сложнее.

Бор при помощи элементарных выкладок, но далеко не безупречным в смысле логики путем выводит выражение для энергии электрона E_n , вращающегося по одной из стационарных орбит. В современных обозначениях это:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{n^2 h^2},$$

где Z — порядковый номер элемента в периодической таблице, $n = 1, 2, 3, \dots$ — так называемое квантовое число, задающее номер орбиты. Затем, предполагая, что при переходе с одной стационарной орбиты на другую электрон испускает *один* квант лучистой энергии, он записывает знаменитое боровское условие для частоты:

$$h\nu = E_{n_1} - E_{n_2}.$$

Отсюда получаем

$$\nu = \frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{h^3} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right). \quad (*)$$

При $Z = 1$ (для атома водорода) и $n_2 = 2$ это совпадает с эмпирической формулой Бальмера

$$\nu = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right), \quad n_1 = 3, 4, \dots,$$

где R — постоянная величина.

Только после завершения этого вывода Бор обращает внимание на то, что для круговых орбит можно получить промежуточное следствие — так называемое правило квантования орбит. Если электрон движется со скоростью v_n по круговой орбите радиусом r_n , то произведение импульса электрона на радиус, называемое в механике моментом импульса, принимает только определенные, дискретные значе-

ния, кратные постоянной Планка:

$$mv_n r_n = n\hbar = n \frac{h}{2\pi}.$$

Теперь, при современных изложениях теории Бора, идут обратным, более простым путем, указанным им самим: сразу постулируют правильность формулы для момента импульса и с ее помощью получают квантование энергии электрона.

При тщательном сравнении формулы (*) с опытными данными обнаружили небольшие расхождения. Бор их быстро устранил, учтя то, что ядро в атоме не неподвижно, а описывает окружность малого радиуса – в планетарной модели атома ядро и электрон вращаются относительно их центра масс, расположенного вблизи ядра. Это приводит к тому, что в формуле (*) вместо m должно входить $m/(1 + m/M)$, где M – масса ядра, у водорода почти в 2000 раз превышающая m . Как нетрудно видеть, поправка действительно мала. Тем убедительнее выглядела модель атома Резерфорда – Бора. Такое же хорошее согласие получалось и для остальных спектральных серий водорода и иона гелия. Однако для других атомов, где число электронов больше одного, эта модель не объясняет спектры их излучения так же хорошо, как для водорода.

Надо сказать, что у Бора не было наивной радости по поводу прекрасного согласия теории и опыта. До конца Бор сохранял свое понимание орбитальной модели как условного «образа» атома.

Как ни важны были конкретные результаты, полученные Бором в этой работе, но еще важнее были основные идеи, заключавшиеся в ней. Приведем их в формулировках, данных самим Бором:

«1) Динамическое равновесие системы (имеется в виду атом – В.Ф.) в стационарных состояниях можно трактовать с помощью обычной механики, тогда как переход системы из одного стационарного состояния в другое нельзя трактовать на этой основе.

2) Указанный переход сопровождается испусканием монохроматического¹ излучения, для которого соотношение меж-

¹ Квантовым представлениям не противоречит испускание атомом сразу нескольких фотонов при переходе из одного стационарного состояния в другое. Но тогда излучение перестает быть монохроматическим. Линейчатые спектры, объясненные Бором, соответствуют именно однофотонным процессам.

ду частотой и количеством выделенной энергии именно такое, которое дает теория Планка».

Существование стационарных состояний Бор «объяснил», приняв в качестве постулата, что, вопреки классической электродинамике, в этих состояниях электрон, движущийся ускоренно по орбите, не излучает. Только гений такого масштаба, как Бор, мог решиться на этот шаг. Так родились знаменитые постулаты Бора.

Напомним, что первая работа Планка не была лишена противоречивости. Прокладывание принципиальных путей в науке вообще дело весьма нелегкое. Бор, смело идя на разрыв с классической электродинамикой, вместе с тем использует соображения, из которых родился важный физический принцип — принцип соответствия. Он заключается в том, что все-таки должно существовать некое «соответствие» между результатами квантовых и классических рассмотрений. В предельном случае (когда величина квантов стремится к нулю) это соответствие должно переходить в простое совпадение — подобно тому, как механика Эйнштейна переходит в механику Ньютона при скоростях, малых по сравнению со скоростью света.

Принцип соответствия, несмотря на свою несколько туманную формулировку, сыграл огромную роль в развитии физики атомов и молекул. Ученик Бора нидерландский физик-теоретик Крамерс, с большим успехом применивший этот принцип в своей работе, писал: «Мое глубокое убеждение состоит в том, что в области человеческого мышления вообще, и в физике в частности, наиболее важные и самые плодотворные концепции это те, которым невозможно придать точно определенный смысл». Эти слова друга Крамерса взяли в качестве эпиграфа к посмертному изданию его сочинений.

В первой работе Бора еще не было сформулированного им принципа дополнительности. Для света, например, этот принцип проявляется в том, что полное описание его свойств должно включать в себя такие противоположные понятия, как волна и частица (фотон). Эти понятия как бы дополняют друг друга. Когда Бор был награжден высшим датским орденом Белого Слона и тем самым получил дворянство, он выбрал себе герб с изображением древнекитайского символа инь-янь, где одна светлая фигура, похожая на запятую, дополняет такую же темную фигуру до полного круга. На гербе по-латыни написан девиз: «Противоположности дополняют друг друга».

«Ну, погоди!»

В этой статье пойдет речь о физическом явлении, которое можно было наблюдать в седьмой серии мультфильма «Ну, погоди!». Помните, как волк на парусной яхте старается догнать зайца, плывущего на пароходе? Для ускорения хода яхты волк дует в парус. На первый взгляд может показаться, что ситуация, в известном смысле, сходна с той, что была описана бароном Мюнхгаузеном: попав в болото, барон сам себя вытащил за волосы. Однако имеется существенное различие в этих двух случаях. Волк не нарушил один из основных законов механики – третий закон Ньютона, тогда как барон его нарушил, что, конечно, невозможно.

В «Началах»¹ Ньютона третий закон сформулирован так: «Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе – действия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны». Ньютон пояснил: «Если что-либо давит на что-нибудь другое или тянет его, то оно само этим последним давится или тянется. Если кто нажимает пальцем на камень, и палец его также нажимается камнем». Из третьего закона Ньютона следует, что никакое взаимодействие тел внутри замкнутой системы (из которой ничего не вылетает наружу) не может изменить движения системы в целом. В частности, взаимодействие отдельных частей организма барона Мюнхгаузена (рук и волос) не могло вызвать изменение скорости его погружения

Опубликовано в «Кванте» №9 за 1986 год.

¹ «Математические начала натуральной философии» – так назвал Ньютон свой главный труд, в котором изложил результаты исследований по механике (этот труд вышел в свет в 1687 году). В «Началах» (так коротко называют эту работу Ньютона) содержатся основные понятия классической механики, три закона движения (законы Ньютона) и закон всемирного тяготения.



в болото, а тем более вытащить его оттуда.

Чтобы хотя бы замедлить погружение, барон должен был начать раздеваться и бросать с силой предметы своего туалета вниз, в болото, т.е. нарушить замкнутость системы. Здесь особенно полезны были бы тяжелые ботфорты. Наконец, барон мог стать на седло и прыгнуть за пределы болота. Но при этом он толкнул бы вниз коня и

тем самым ускорил бы погружение бедного животного в болото.

Однако вернемся к «Ну, погоди!». Предположим, что парус яхты сделан из материи, которая поглощает струю воздуха, выпускаемую Волком. Тогда яхта с Волком на ней представляла бы замкнутую систему, и при отсутствии ветра она не смогла бы сдвинуться с места, как бы Волк ни старался. Так же бесплодны были бы попытки Волка ускорить дутьем ход яхты: давление на парус воздушной струи, выпускаемой Волком, уравнивалось бы действием когтей Волка на палубу яхты. Дело в том, что дующий вперед Волк испытывает отдачу, направленную назад (действие и противодействие).

Здесь имеется аналогия с выстрелом из ружья или орудия, когда пуля или снаряд вылетают в одном направлении, а ружье или орудие начинают двигаться в противоположном направлении. Каждый охотник или артиллерист знает это. Еще ближе — аналогия с ракетой, из хвоста которой вырываются продукты сгорания, а она сама летит в противоположном направлении.

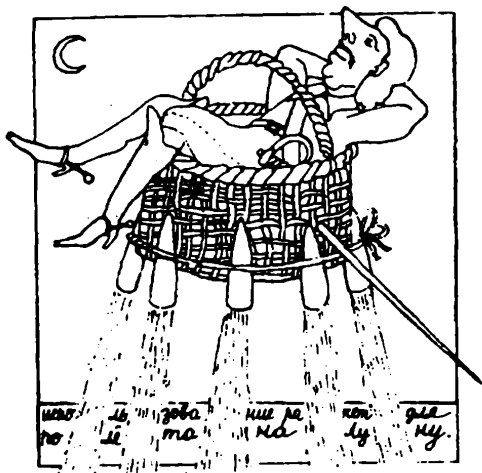
В фильме «Ну, погоди!» на яхте стоит обыкновенный парус, который, конечно, отражает струю воздуха, выпускаемую Волком. Струя после отражения уходит назад, выходит из системы «яхта с Волком». Иными словами, система перестает быть замкнутой. Возникает явление отдачи, ускоряющее движение яхты.

Вся реактивная авиация использует явление отдачи, возникающее при испускании двигателями назад газовых струй. Созданные советскими конструкторами во время Великой Отечественной войны «катюши», использовали тот же эффект.

Возвращаясь к Волку, надо признать, что он оказался более сведущ в механике, чем барон. Вместе с тем можно внести рационализаторское предложение. Волку было бы выгоднее стать спиной к пароходу и дуть в обратную сторону – ведь парус не является идеальным отражателем для воздушной струи, струя от паруса уходит ослабленной.

Сирано де Бержерак

Эффект отдачи, как известно, лежит в основе применения ракет для космических путешествий. Вот тут мы подошли к французскому писателю Сирано де Бержераку (1619 – 1655). Это очень своеобразная фигура в истории мировой литературы. Сирано происходил из захудалого дворянского рода и всю жизнь очень нуждался. В ту эпоху процветали только поэты, поступавшие на службу в свиту кого-либо из богатых аристократов. Для Сирано такой путь был закрыт из-за его крайне независимого и вспыльчивого характера. Сирано писал стихотворные листовки, направленные против всесильного первого министра Франции кардинала Мазарини («мазаринады»). Он пытался разбогатеть за счет картежной игры, но безуспешно. Природа наградила Сирано огромным карикатурным носом, вызывавшим постоянные насмешки, что служило поводом для бесконечного числа дуэлей. И вот этот картежник и дуэлянт был глубоким мыслителем, последователем философа-материалиста Гассенди² и создателем замечательного научно-фантастического романа «Иной свет, или Государства и империи луны», изданного в 1657



² Пьер Гассенди (1592 – 1655) – французский философ и ученый. Занимался исследованиями по механике, акустике, оптике, теплоте.



году, уже после смерти автора.

Для нас интересно то, что в романе Сирано описывает свой полет на Луну... с помощью ракет! Есть старинная гравюра, изображающая Сирано, летящего к Луне в корзине, к которой прикреплены ракеты, испускающие огненные струи по направлению к Земле и тем самым поднимающие корзину. Таким образом, Сирано за триста

лет предвидел применение ракет для космических путешествий. Любопытно также, что в романе, написанном более чем за тридцать лет до выхода в свет «Начал» Ньютона, Сирано утверждает, что притяжение Луной пересилит притяжение Землей на расстоянии, меньшем от Луны, чем от Земли, так как масса Луны меньше массы Земли, и даже вычисляет отношение этих расстояний (получает, конечно, неверный численный результат — 3 вместо примерно 9).

Сирано иронически описывает Луну как место, где находится земной рай. Он там якобы встречает пророка Илью и выясняет у него, как тот добрался до Луны. И пророк описывает свой способ путешествия, противоречащий третьему закону Ньютона. Пророк Илья построил железную колесницу (есть поверье, что гром во время грозы — это громохание колесницы пророка Ильи при его поездках по небесам) и, сев в нее, стал подбрасывать вверх намагниченный железный шар. Шар подтягивал за собой каждый раз колесницу, и таким образом пророк достиг Луны. Пророк не учел отдачи, которую будет испытывать колесница при каждом броске шара, и оказался предшественником «правдолюбивого» барона Мюнхгаузена.

Во второй половине девятнадцатого века французский драматург Эдмон Ростан (1868 — 1918) написал пьесу «Сирано де Бержерак», пользующуюся до сих пор большим успехом. Пьеса названа автором героической комедией, что точно отражает ее характер — веселый и одновременно романтически возвышенный.

Управляемый термоядерный синтез и явление отдачи

Теперь мы перенесемся в наше столетие и даже в первую половину будущего, двадцать первого века. Речь пойдет о новейшей технике, создание которой еще далеко не завершено. Мы имеем в виду управляемый термоядерный синтез (УТС) с инерционным удержанием плазмы. УТС такого типа ведет свое начало с работы советских физиков Н.Г.Басова и О.Н.Крохина, предложивших в 1962 году применить лазеры для поджига термоядерной реакции. При этом лучи многих мощных лазеров фокусируются со всех сторон на небольшую мишень. Интенсивность лазерных лучей меняется по определенному закону со временем. Сначала лучи вызывают быстрое испарение поверхностного слоя мишени. Это приводит к сильному сжатию (в сотни, тысячи раз) внутренних частей мишени за счет эффекта отдачи, возникающего при испарении поверхностного слоя. Сжатие необходимо для сближения ядер атомов, вступающих в термоядерную реакцию. Подчеркнем, что преждевременное нагревание внутренних частей мишени помешало бы сжатию. Поэтому их нагрев производится уже после сжатия. Для эффективности сжатия надо достаточно равномерно «осветить» со всех сторон мишень, что представляет далеко не простую задачу. Только тогда «ветры», возникающие за счет испарения наружного слоя мишени, приобретут должную структуру, необходимую для сильного сжатия. Иначе произойдет выпячивание слабоосвещенных частей мишени. Советская лазерная установка «Дельфин» создает 216 пучков для освещения мишени размером меньше горошины. Приведем еще одну интересную цифру. Недавно опубликованная советская работа по лазерной УТС имеет в заголовке 28 авторов.

Для автоматизированного управления сложной установкой лазерной УТС приходится широко применять быстродействующие ЭВМ и последние достижения нелинейной оптики.

Появились конкуренты лазерному УТС – установки, использующие мощные электронные или ионные пучки. Но все они предполагают сжатие за счет испарения ее поверхностного слоя и возникающего при этом явления отдачи.

ЗАЧЕМ МЫ ЗИМОЙ ИСПОЛЬЗУЕМ ОТОПЛЕНИЕ?

Заметку с таким названием опубликовал в 1938 году немецкий астрофизик Р.Эмден в английском журнале «Nature» («Природа»). Это своеобразный журнал, где оригинальные научные работы (а некоторые из них удостоиваются впоследствии Нобелевских премий) публикуются совместно с популярными статьями, написанными на различные темы.

Хотя заметка Эмдена и была популярной, она все же не прошла незамеченной: выдержки из нее и ее обсуждение можно найти в шестом томе курса теоретической физики А.Зоммерфельда – видного физика-теоретика, много сделавшего для развития боровской теории строения атома. Вот что пишет Эмден в своей заметке: «На вопрос, почему мы топим зимой, неспециалист ответит: чтобы сделать комнату теплее; знаток термодинамики выразится, возможно, следующим образом: чтобы подвести недостающую энергию. В таком случае правым окажется профан, а не ученый». Разберемся, почему так.

Специалист имеет в виду внутреннюю энергию воздуха, которым заполнены наши дома, а в условиях, типичных для жилых помещений, воздух ведет себя как идеальный газ (точнее говоря, как смесь идеальных газов). Энергия идеального газа пропорциональна абсолютной температуре T и количеству вещества, а значит, и массе газа m . Поэтому для внутренней энергии воздуха можно написать

$$U = amT, \quad (1)$$

где a – некоторая постоянная.

Теперь становится очевидной та ошибка, которую допустил ученый. Он забыл, что в данной ситуации масса воздуха m является функцией температуры. И действительно – жилое помещение не изолировано от внешнего мира; при протапливании воздух, нагреваясь, расширяется и частично выходит

сквозь щели и поры в стенах наружу. Чтобы определить зависимость m от T , воспользуемся уравнением Менделеева – Клапейрона для идеального газа

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (2)$$

где M – молярная масса воздуха, R – универсальная газовая постоянная. Объем помещения V у нас не изменяется, давление p остается постоянным, равным внешнему давлению воздуха. Следовательно, правая часть уравнения (2) также должна, несмотря на изменение температуры, сохранять постоянное значение. Это возможно только при условии постоянства произведения mT .

Заметим, что обычно уравнение Менделеева – Клапейрона применяется в случаях, когда масса m фиксирована. В рассматриваемой нами задаче это условие не выполняется, и, согласно уравнению (1), внутренняя энергия воздуха при постоянстве произведения mT должна оставаться неизменной. Увеличение средней кинетической энергии отдельной молекулы компенсируется уменьшением числа молекул.

Температура воздуха в помещении влияет на температурный режим работы человеческого тела. Слишком низкая температура вызывает сильное переохлаждение организма, в результате чего затрудняется протекание химических реакций, которые обеспечивают обмен веществ.

Будучи астрофизиком, Эмден не мог не вспомнить о роли Солнца как своеобразной «печки», что греет Землю своим излучением. Хотя Земля почти всю энергию, полученную от Солнца, излучает обратно в мировое пространство, оставшейся части энергии, которая, видоизменяясь, переходит в окружающую среду, вполне хватает, чтобы поддерживать на поверхности Земли необходимую для жизни температуру. Мощность солнечной энергии, падающей на единицу площади земной поверхности, определяет уровень температуры T (чем объясняется смена времен года и наличие климатических поясов), а тепло недр Земли составляет тысячные доли от тепла солнечных лучей и его совершенно недостаточно для поддержания жизни. Поэтому опасность ядерной войны, по современным подсчетам ученых, состоит не только в разрушениях и непосредственном воздействии взрывов на живые организмы, но и в возникновении «ядерной зимы» – ведь многочисленные пожары вызовут огромные тучи копоти и сажи, которые будут непроницаемы для солнечных лучей.

Эти тучи окутают всю Землю, независимо от того, где возникнет «пожар» ядерной войны. Солнечное «отопление» Земли окажется выключенным, и на Земле наступит ледниковый период.

Но вернемся к проблемам отопления жилых помещений. В уравнениях (1) и (2) фигурирует температура в кельвинах. Абсолютная шкала температур названа шкалой Кельвина в честь английского физика У.Томсона, получившего за большие заслуги в области науки и техники титул лорда Кельвина. Титул был выбран по названию реки, на берегу которой стоит университет Глазго. В этом университете Томсон преподавал физику пятьдесят лет. Примечательно, что в семейном кругу шутливо обсуждались и другие варианты титула – лорд Кабель или лорд Компас. Они отражали две заслуги Томсона: он участвовал в создании первого трансатлантического кабеля из Америки в Англию в 1866 году и внес радикальные усовершенствования в конструкцию компасов для морских судов. Поэтому неудивительно, что, занимаясь разработкой основ термодинамики, Томсон задумался над рациональностью нашей системы отопления. В 1852 году он опубликовал работу, в которой показал, что использование так называемых тепловых насосов в несколько раз выгоднее обычных отопительных устройств. В тепловых насосах, которые работают по принципу холодильной машины, энергия затрачивается на перевод тепла от более холодного наружного воздуха к более теплему воздуху в помещении.

Идеи Томсона долгие годы не получали развития и практического применения. В 1920 году на первом съезде советских физиков профессор В.А.Михельсон, известный своими работами в области теории теплового излучения, сделал доклад «О динамическом отоплении», в котором в значительной степени развил и дополнил идеи Томсона. Михельсон предложил использовать в тепловых насосах процессы испарения и конденсации рабочего вещества, что и делается в современных конструкциях. За последние десятилетия началось довольно широкое применение тепловых насосов для отопления. В частности, зимой прошлого года в ялтинском пансионате «Дружба» начала работать отопительная теплонасосная установка, где тепло извлекается из морской воды с температурой 8 °С. Так что согреться можно и с помощью холода.

Моя первая, но, к сожалению, не последняя крупная научная неудача связана с участием в первых работах по исследованию комбинационного рассеяния света.

Явление комбинационного рассеяния света было открыто в 1928 году советскими физиками Г.С.Ландсбергом и Л.И.Мандельштамом – в кристаллах и, независимо, индийский физиком Ч.Раманом – в жидкостях. Эффект комбинационного рассеяния получил название эффекта Рамана, и Раман был удостоен Нобелевской премии. Советские физики премию не получили, что явно несправедливо.

История этого открытия довольно своеобразна.

В 1923 году австрийский физик Смекал опубликовал теоретическую работу, в которой дал совершенно четкое предсказание явления комбинационного рассеяния света. В 1926 году голландец Крамерс и немец Гейзенберг повторили предсказание Смекала в более развернутом виде. Французские физики Рокар и Кабанн пытались экспериментально подтвердить предсказания теоретиков, однако потерпели неудачу ввиду слабости эффекта.

Комбинационное рассеяние представляет одну из разновидностей молекулярного рассеяния света. Здесь хочется вспомнить одну поучительную историю, связанную с рождением теории молекулярного рассеяния.

О голубом цвете неба. Максвелл, экзаменуя Рэлея, будущего знаменитого физика, предложил ему, в качестве задачи, дать объяснение голубого цвета неба. Рассказывают, что Максвелл намекнул Рэлею, что явление должно быть связано с молекулярной структурой воздуха. Еще Леонардо да Винчи было ясно, что голубой цвет неба объясняется «телесностью воздуха», рассеянием солнечного света атмосферой. Рэлей рассмотрел этот вопрос с позиции волновой теории света. Световая волна, распространяющаяся в атмосфере,

Опубликовано в «Кванте» №4 за 1991 год.

вызывает колебания в молекулах воздуха (теперь мы скажем «колебания электронов», Рэлей и Максвелл еще не знали об их существовании). Молекулярные колебания сопровождаются испусканием световых волн. Молекулы работают подобно ретрансляционным радиостанциям. Каждая молекула испускает вторичные волны, которые, согласно Рэлею, и составляют рассеянный свет. При этом Рэлей показал, что интенсивность света, рассеянного каждой молекулой, обратно пропорциональна четвертой степени длины волны рассеиваемого света (это закон был им установлен в 1871 г.). Тем самым, голубой цвет неба был объяснен – синие и голубые лучи обладают более короткими длинами волн, чем красные и желтые, поэтому голубые и синие лучи рассеиваются сильнее. Количественное сравнение результатов экспериментального исследования с расчетом Рэля дало прекрасное совпадение. Максвелл, очевидно, был доволен своим учеником, и работа Рэля была опубликована. Как будто все обстояло хорошо.

Однако в 1907 году Мандельштам обратил внимание на то, что вторичные волны, рассеянные отдельными молекулами, когерентны между собой. Это значит, что должно вроде бы происходить интерференционное гашение волн, расстояние между которыми равно половине длины волны света. Выяснилось, однако (Смолуховский, 1908 г.; Эйнштейн, 1910 г.), что этого не происходит благодаря тому, что в пространственном распределении молекул существуют неоднородности (их называют флуктуациями). Те участки, где молекул больше, рассеивают свет сильнее, чем разреженные участки. Впрочем, это уже другая история. Мы же вернемся к явлению комбинационного рассеяния.

Что такое комбинационное рассеяние? Рассеяние света на молекулах, которое изучал Рэлей при объяснении голубого цвета неба, происходит без изменения частоты (частота рассеянного света равна частоте падающего). Такое рассеяние можно назвать упругим, так как состояние молекулы (или атома) после рассеяния такое же, как до него. При комбинационном рассеянии изменяется состояние молекулы, и рассеянный свет имеет частоту, отличную от частоты падающего. Экспериментально в рассеянном свете были обнаружены две новые линии (сателлиты): одна с частотой, большей падающей, другая – с меньшей. Каково же физическое объяснение этого явления?

Изменение частоты при комбинационном рассеянии света можно объяснить как на квантовом, так и на волновом языке.

Как мы увидим, в данном случае квантовый язык проще и правильное отражает особенности явления.

Квантовое сложение и вычитание. Смекал рассматривал комбинационное рассеяние как неупругие столкновения фотонов с атомами и молекулами.

Как известно, согласно квантовой теории, атомы и молекулы могут обладать только определенными запасами внутренней энергии – находиться на определенных энергетических уровнях. Если происходит неупругое столкновение фотона (энергия $h\nu_0$) с невозбужденной молекулой (или атомом), находящейся на нижнем энергетическом уровне E_1 , то фотон отдает часть своей энергии и возбуждает молекулу до более высокого энергетического уровня E_2 . После такого столкновения от молекулы отлетает фотон с уменьшенной энергией $h\nu_k$ (индекс «к» – от слова «красный»):

$$h\nu_k = h\nu_0 - (E_2 - E_1).$$

Если неупругое столкновение фотона происходит с уже возбужденной молекулой, то она переходит с уровня E_2 на уровень E_1 и возникает фотон с увеличенной энергией $h\nu_\phi$ (индекс «ф» – от слова «фиолетовый»):

$$h\nu_\phi = h\nu_0 + (E_2 - E_1).$$

В первом случае из кванта лучистой энергии вычитается квант внутримолекулярной энергии, а во втором – происходит сложение этих квантов.

Таким образом, в рассеянном свете наряду с частотой ν_0 (упругие столкновения фотонов с атомами и молекулами) должны появиться частоты ν_k и ν_ϕ . В спектре рассеянного света этому соответствуют две спектральные линии (спутники), симметрично сдвинутые относительно центральной линии с частотой ν_0 . Однако интенсивности спутников резко различны. Здесь имеет место сильная асимметрия: интенсивность красного спутника (ν_k) значительно выше интенсивности фиолетового спутника (ν_ϕ). Объясняется эта асимметрия весьма просто. Ведь красный спутник возникает в результате столкновений фотонов с нормальными атомами или молекулами, а фиолетовый – с возбужденными. Но в обычных условиях возбужденных атомов и молекул всегда значительно меньше, чем нормальных, поэтому и столкновения фотонов с ними происходят гораздо реже, чем с нормальными атомами и молекулами.

Классическое умножение. На классическом языке комбинационное рассеяние аналогично процессу передачи информации по радио. На эту аналогию обратил внимание Мандельштам сразу же после экспериментального открытия явления. Передача информации по радио связана с использованием модулирования радиоволн. Мы ограничимся одним типом модулирования, имеющим наиболее широкое применение, – амплитудной модуляцией.

Дело в том, что идеальная волна синусоидальной формы, с унылым постоянством повторяющая свою форму во времени, не способна перенести информацию из одного места в другое. Необходимо нарушить правильность формы волны, сделать на ней «зарубку» и наблюдать переход «зарубки» из одной точки пространства в другую. Такой «зарубкой» служит изменение амплитуды волны. Певец с помощью микрофона модулирует амплитуду радиоволны, и эта волна несет информацию об исполняемой им песне. Звуковые волны с циклической частотой $\omega_{\text{зв}} = 2\pi\nu_{\text{зв}}$ вызывают колебания мембраны микрофона, которые преобразуются в электрические колебания такой же частоты. С их помощью осуществляется амплитудная модуляция радиоволны.

Воспользуемся услугами тригонометрии для более подробной характеристики волны. Пусть амплитуды волны A не постоянна, а равна $1 + a \cos \omega_{\text{зв}} t$, тогда для модулированной волны мы получим выражение

$$E = (1 + a \cos \omega_{\text{зв}} t) \cos \omega_0 t,$$

где ω_0 – циклическая частота несущей волны (радиочастота). Используя известное тригонометрическое соотношение

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} (\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)),$$

эту формулу можно переписать в виде

$$E = \cos \omega_0 t + \frac{a}{2} (\cos(\omega_0 + \omega_{\text{зв}})t + \cos(\omega_0 - \omega_{\text{зв}})t).$$

Таким образом, модулированную волну можно рассматривать как состоящую из трех волн, каждая из которых имеет постоянную амплитуду. Частоты этих волн равны ω_0 , $\omega_0 + \omega_{\text{зв}}$ и $\omega_0 - \omega_{\text{зв}}$.

Аналогичные явления происходят и при молекулярном рассеянии. При взаимодействии с колеблющейся молекулой

(или атомом) происходит как бы «модуляция» падающей волны с частотой, соответствующей частоте колебаний самой молекулы. Значит, аналогично квантовой картине, в спектре рассеянного света появляются два сателлита, симметрично сдвинутые относительно центральной линии на частоту колебаний молекулы.

Как видно из полученной формулы, амплитуды этих сателлитов должны быть равны между собой, что противоречит и опыту, и квантовой картине.

Как я измерял постоянную Планка h . Мне, студенту третьего курса, Ландсберг и Мандельштам поручили экспериментальную проверку справедливости квантовой теории комбинационного рассеяния света. Одновременно следовало использовать эти измерения как новый метод определения значения h (его нужно было извлечь из измерения интенсивности сателлитов). И тут я потерпел неудачу, так как в 1928 году еще не было ясности в том, что интенсивности сателлитов должны относиться просто как концентрации возбужденных и невозбужденных молекул. Применялась сложная формула, подставив в которую экспериментальные данные, я получил значение h раза в полтора меньше общепринятого. Результат меня обескуражил. Через некоторое время появилась работа французского физика Дора, проделавшего те же эксперименты, но воспользовавшегося правильной формулой для интенсивности сателлитов и получившего значение h , хорошо согласующееся с общепринятым. После обработки по правильной формуле мои данные тоже дали прекрасное согласие, но я посчитал, что публиковать их нет смысла, несмотря на предложение моих учителей. Дело ограничилось ссылкой в одной из статей Ландсберга и Мандельштама, опубликованной в 1930 году.

Любопытно, что неправильность формулы, которой пользовался я, связана с предположением о значительной роли в комбинационном рассеянии актов вынужденного испускания фотонов, введенных в физику Эйнштейном.¹

Через десять лет, в 1940 году, я указал на возможность экспериментального обнаружения вынужденного испускания фотонов. В 1951 году я совместно с Бутаевой и Вудынским описал в авторской заявке способ усиления света,

¹ При вынужденном излучении падающий фотон не изменяет свою энергию, а лишь дает «сигнал» к излучению молекулой (атомом) дополнительного фотона.

основанный на использовании этих актов. Мы получили соответствующее авторское свидетельство. Как известно, указанный способ усиления света применяется в лазерах. К сожалению, я не указал в явной форме на очень важное свойство – на когерентность испущенного и падающего излучений. Именно это свойство акта вынужденного излучения и позволяет создавать оптические лазерные генераторы.

Сталкивались ли вы когда-нибудь с двумя различными – но правильными! – описаниями одного и того же физического явления? Если нет, то так называемые вариационные принципы, играющие очень важную роль в современной физике, могут послужить хорошей тому иллюстрацией.

Вариационные принципы имеют многовековую историю. Вот лишь некоторые ее этапы.

Герон Александрийский (I век), популяризатор науки, инженер, изобретатель автомата для продажи священной воды, прибора для измерения протяженности дорог (современного таксометра), паровой турбины и других любопытных устройств, сформулировал следующий оптический постулат: «Скажу, что из всех лучей, падающих из данной точки и отражающихся в данную точку, минимальны те, которые от плоских и сферических зеркал отражаются под равными углами».

Надо полагать, что это одна из первых формулировок вариационного принципа.

Для плоского зеркала справедливость своего постулата Герон доказал с помощью простого геометрического построения. Пусть A – источник света, B – глаз, MD – зеркало, AFB – действительный путь света, AKB – какой-либо другой возможный путь света, испытавшего отражение

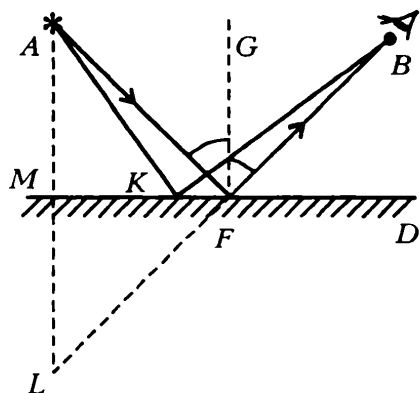


Рис. 1

(рис.1). Продолжим луч BF до встречи в точке L с продолжением перпендикуляра AM . Так как угол падения AFG равен углу отражения GFB , то $AM = ML$ и, следовательно,

Опубликовано в «Кванте» №5 за 1992 год.

$AF = FL$. Тогда $AF + FB = FB + FL$, т.е. AFB – кратчайший путь. Для сферических зеркал постулат Герона не всегда верен – в некоторых случаях путь света оказывается минимальным, а в некоторых – максимальным.

В XVII веке знаменитый математик П. Ферма сформулировал принцип, представляющий обобщение утверждения Герона. Согласно этому принципу, свет всегда идет по пути, требующему для своего прохождения минимальное время. Очевидно, что для случая отражения света принцип Ферма эквивалентен постулату Герона. Принцип Ферма сохраняет свою справедливость и для случая преломления света на границе раздела двух сред, тогда как постулат Герона здесь становится неприменимым. Это можно доказать, используя закон преломления света. Заметим, что если обратить последовательность рассуждений, то из принципа Ферма нетрудно вывести законы отражения и преломления света. По существу это и оправдывает применение к утверждению Ферма термина «принцип», а к утверждению Герона – «постулат».

Важно подчеркнуть, что Ферма считал скорость света в более плотной среде меньшей, чем в менее плотной. А вот современник Ферма, философ и математик Р. Декарт исходил из противоположного соотношения скоростей. Он вывел закон преломления, рассматривая свет как поток частиц, подчиняющихся законам механики. Между Ферма и Декартом возникла острая полемика, продолжавшаяся до самой смерти Декарта. Строго говоря, до опытов Фуко по прямому измерению скорости света в различных средах (середина XIX века) правота Ферма не имела прямых доказательств.

На первый взгляд, получение действительных изображений в оптических системах противоречит принципу Ферма – ведь между точкой (A) и ее изображением, например в линзе, (A') проходит бесконечное число лучей различной формы и длины (рис. 2). Однако все дело заключается в том, что время прохождения светом всех лучей одно и то же. В стекле линзы свет идет медленнее, чем в воздухе, поэтому, хотя крайние лучи имеют большую длину, чем центральные, времена их прохождения выравниваются. Из требований равенства этих времен можно непосред-

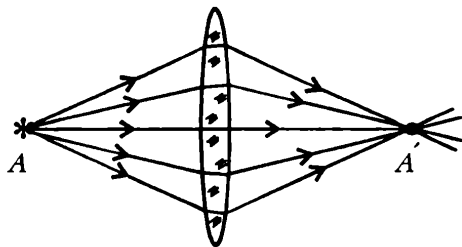


Рис. 2

редственно получить формулу линзы, не используя при этом закон преломления света.

Итак, на примере законов распространения света можно проиллюстрировать основную идею вариационного принципа. Она состоит в следующем: физические явления происходят таким образом, что некоторая величина, при рассмотрении явления в целом, принимает экстремальное – максимальное или минимальное – значение.

Заметим, что, в отличие от знакомых старшеклассникам дифференциальных методов нахождения экстремума функции, вариационный метод – интегральный, поскольку связан с поисками функции, интеграл которой на определенных участках принимает экстремальное значение.

В механике вариационные принципы ведут свою историю с конца XVII века, когда И.Бернулли опубликовал заметку, озаглавленную «Новая задача, к разрешению которой приглашаются математики». Это была задача о брахистохроне, или кривой наискорейшего спуска: даны две точки в вертикальной плоскости, надо найти вид кривой линии, спускаясь по которой (без трения) тяжелое тело прошло бы путь между этими точками за наименьшее время. Решение этой «столь прекрасной и до сих пор неслыханной задачи» было дано самими Бернулли, а также Г.Лейбницем, И.Ньютоном и другими учеными. Бернулли в своем решении исходил из аналогии между распространением луча света в среде с непрерывно изменяющимся по высоте показателем преломления и движением тела под действием силы тяжести. Луч в такой среде имеет криволинейную форму, аналогичную траектории движения тела. Работа Бернулли послужила началом весьма плодотворных аналогий между оптикой и механикой, приведших позднее к результатам, которые легли в основу современной физики.

Следующий шаг по пути развития вариационных принципов механики сделал в первой половине XVIII века П.Мопертюи, в молодости служивший драгунским офицером, а позднее назначенный прусским королем Фридрихом II президентом Берлинской Академии наук.

Мопертюи, подобно Декарту, рассматривал свет как поток частиц, подчиняющихся законам механики, но при этом выдвинул новую идею – так называемый принцип наименьшего действия. Согласно этому принципу, для реального пути света «количество действия должно быть наименьшим». Под «действием» Мопертюи понимал произведение скорости на

путь. Потребовав для частиц света минимальности действия, он вывел законы отражения и преломления. Причем Мопертюи использовал соотношение для скоростей света в различных средах такое же, как и Декарт, т.е. противоположное соотношению Ферма. (История принципа Мопертюи еще раз показывает, что к правильному результату можно прийти и на основе неверных посылок. В данном случае ошибкой было уподобление света материальным частицам классической механики.)

Великие математики и механики Л.Эйлер, Ж.Лагранж и У.Гамильтон придали понятию «действие» то содержание, которое используется и в настоящее время. Произведение скорости на путь легко преобразовать в произведение квадрата скорости на время, а если ввести еще постоянный множитель, равный массе тела, деленной на два, то мы получим произведение кинетической энергии на время. Это и есть современное определение понятия «действие» в отсутствие сил. При наличии же сил «действие» равно среднему значению разности между кинетической и потенциальной энергиями, умноженному на время движения. Был создан специальный математический аппарат для решения задач, связанных с применением принципа наименьшего действия. Этот аппарат получил название вариационного исчисления.

Понятие «действие» приобрело в физике особое значение после введения М.Планком, основателем квантовой физики, понятия «квант действия», равного фундаментальной постоянной h . Наличие h в каком-либо физическом соотношении свидетельствует о том, что оно может быть выведено только из квантовых представлений. Сопоставление принципов Ферма и Мопертюи натолкнуло Л. де Бройля на идею о наличии у частиц вещества волновых свойств, что вскоре было подтверждено на опыте. Формула для длины волны де Бройля содержит постоянную h .

В связи с идеей де Бройля, один из создателей квантовой механики Э.Шредингер провел глубокий анализ вариационных принципов оптики и механики, приведший к составлению знаменитого уравнения квантовой механики, носящего теперь его имя.

В наши дни вариационные принципы широко применяются не только в оптике и механике, но также и в электродинамике и термодинамике.

СБОРНИК СТАТЕЙ В.А.ФАБРИКАНТА

Составители *В.А.Тихомирова, А.И.Черноуцан*

Редактор *В.А.Тихомирова*
Литературный редактор *Л.В.Кардасевич*
Технический редактор *Е.В.Морозова*
Компьютерная группа
Е.А.Митченко, Л.В.Калиничева

ИБ № 39

Формат 84×108 1/32. Бум. офс. нейтр. Гарнитура кудряшевская.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,72.
Заказ **1416**.

117296 Москва, Ленинский пр., 64-А
«Квант»

Отпечатано на Ордена Трудового Красного Знамени
Чеховском полиграфическом комбинате
Комитета Российской Федерации по печати
142300 г.Чехов Московской области
Тел. (272) 71-336, факс (272) 62-536