

ЛЕКЦИИ
ПО ИЗБРАННЫМ ВОПРОСАМ ОПТИКИ
(1932—1933 гг.)

ПЕРВАЯ ЛЕКЦИЯ

(19.X 1932 гг.)¹

*Роль парадоксов в развитии науки и при ее изучении.
Содержание курса*

Вопросы, которые мы будем рассматривать, выбраны по несколько необычному принципу. В истории развития науки большую роль играли противоречия взглядов — парадоксы. Два рода взглядов вступают в конфликт, и он вызывает дальнейшее движение науки вперед, дающее разрешение этого конфликта.

Примером этого является возникновение теории относительности. С одной стороны, все говорило за то, что скорость света относительно эфира не зависит от движения источника. К этому, например, приводили наблюдения над движением двойных звезд. Если бы это было не так, то наша электронная теория дисперсии и распространения света в веществе была бы невозможна из-за эффекта Доплера. Но тогда для наблюдателя, движущегося по отношению к эфиру со скоростью v , скорость света будет не c , а геометрическая сумма скорости c и скорости наблюдателя v , что несовместимо с результатом опыта Майкельсона. Этот конфликт был разрешен теорией относительности.

Конфликт, возникший в связи с теорией квант, тоже привел к развитию теории, к созданию новой квантовой механики. Приведем еще два примера.

История развития второго начала термодинамики. Карно (1824) стоял на точке зрения постоянства «количества теплоты» и руководился картиной, аналогичной падению воды с одного уровня на другой. Джоуль же экспериментально доказал возможность возникновения теплоты за счет совершения работы и таким образом заложил экспериментальные основы закона сохранения энергии. Эти два взгляда противоречат друг другу. Кельвин ясно видел это

¹ [Данный текст составлен по запискам С. М. Рытова и М. А. Леонтовича. Материал обработан М. А. Леонтовичем.]

противоречие. Создавая термодинамику, он долго боролся с этим противоречием. Сначала он пытался разрешить его, просто считая опыты Джоуля неверными. Конфликт разрешился в новой системе взглядов — в современной термодинамике.

Другой пример: *H*-теорема статистической механики. Больцман думал, что доказал эту теорему на основе механики. Однако Лошмидт указал, что достаточно в начальный момент обернуть знаки всех скоростей, чтобы процесс пошел в обратную сторону. Из результатов Пуанкаре, как это впервые указал Цермелло, следует, что рано или поздно система придет в первоначальное состояние. Далее Бертран указал Больцману, что при помощи теории вероятности из механики нельзя получить ничего нового (он иллюстрирует это тем примером, что, зная тоннаж и число труб судна, нельзя узнать, сколько лет капитану). Эти противоречия дали громадный толчок к развитию статистической механики.

Конфликты играли и более скромную роль, помогая уяснить картину явления. Наконец, есть еще более скромная область, где парадоксы также играют важную роль — это учебные вопросы. Есть две степени понимания. Первая, когда вы изучили какой-нибудь вопрос и как будто знаете все, что нужно, но вы еще не можете самостоятельно ответить на новый вопрос, относящийся к изучаемой области. И вторая степень понимания, когда появляется общая картина, ясное понимание всех связей. Такие вопросы, на которые нельзя ответить, пока этой второй степени понимания нет, мы называем парадоксами. Разбор подобных парадоксов очень полезен для достижения такого полного понимания.

Парадоксы есть во всех областях, но мы ограничимся некоторыми простыми вопросами из оптики. Конечно, цель наших занятий не решение ребусов, а разбор вопросов по существу. При этом вопросов чисто математического характера, вопросов, связанных со строгостью решения задач, мы не будем касаться.

Замечу, что в выборе вопросов для наших занятий есть известная старомодность, — мы будем разбирать главным образом вопросы классической физики. Однако многие из них имеют интерес и для квантовой физики, так как целый ряд задач волновой механики уясняется разбором вопросов классической оптики.

Охарактеризуем коротко те вопросы, которыми мы будем заниматься. Все вопросы оптики тесно между собой связаны, и нет, например, интерференции и дифракции как особых явлений, но все-таки некоторую классификацию оптических явлений, конечно, ввести можно.

Пусть имеется тонкая пластинка и отраженные ею лучи интерферируют. Разность фаз между лучами, отраженными от передней и задней ее плоскостей, будет при нормальном падении $4\pi \frac{d}{\lambda} - \pi$.

В зависимости от толщины пластинки d будет получаться усиление или ослабление отраженного луча. Амплитуда отраженного света будет заключена между $A + B$ и $A - B$, где A и B — амплитуды лучей, отраженных от задней и передней поверхностей. При этом не делается никаких предположений о величине A и B . Пусть нижняя поверхность идеально отражает, а сама пластинка ничего не поглощает (например, слой воды на ртути). Ясно, что свет должен полностью отразиться при любой толщине пластинки. Между тем предыдущее рассуждение приводит к тому, что амплитуда отраженного пластинкой света должна и в этом случае зависеть от ее толщины.

Заметим, что то обстоятельство, что при отражении должно происходить изменение фазы на π на одной из поверхностей раздела, вытекает из простых соображений. Если стремиться толщину пластинки к нулю, то в пределе от нее не должно быть отражения. Это значит, что лучи, отраженные от ее двух поверхностей, имеют противоположные фазы. Но при бесконечно малой толщине пластинки разность фаз может получиться только из-за изменения фазы при отражении от поверхности.

Укажу еще на один парадокс из этой же области. Возьмем стеклянную пластинку, такую, что разность фаз лучей, отраженных ее передней и задней поверхностями, равна π . Через такую пластинку пройдет весь падающий на нее свет — она ничего не будет отражать. На пути луча можно поставить ряд таких пластинок, и так как результат не зависит от расстояния между ними, то их можно поставить вплотную. Мы получаем целое полупростран-

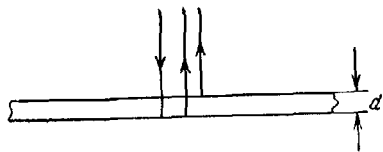


Рис. 1.



Рис. 2

ство, заполненное прозрачным стеклом, от которого не получается никакого отражения. Между тем обычно говорят, что формулы Френеля *доказывают*, что при падении света на границу двух сред с разными показателями преломления всегда происходит отражение.

Есть ряд более сложных вопросов, касающихся связи термодинамики с оптическими явлениями. Пусть имеются два излучающих осциллятора, две светящиеся точки. Если они излучают оба, то получится интерференционная картина. Энергия поля будет в

некоторых местах нуль, в других же — в четыре раза больше, чем в том случае, когда излучает один из них. Если подсчитать поток энергии через замкнутую поверхность, охватывающую оба источника, то он оказывается не равным сумме потоков энергии от каждого из них. Это ясно без вычислений в случае, когда расстояние между источниками значительно меньше половины длины волны. В этом случае, очевидно, ослабления поля нигде не будет. Фактически этот вопрос встал в беспроводной телеграфии в случае двух антенн. Здесь как будто получается противоречие с законом сохранения энергии.

Другой курьезный вопрос возник у В. Вина. Он связан с явлением вращения плоскости поляризации света при распространении его в теле при наличии магнитного поля (явление Фарадея).

Магнитное вращение плоскости поляризации обладает следующим свойством, отличающим его от обычного вращения плоскости поляризации в оптически активных телах. При магнитном вращении знак угла поворота по отношению к определенному в пространстве направлению не зависит от направления луча. Посылая пучок света в одном направлении, отражая лучи и посылая их обратно, мы увеличиваем угол поворота вдвое по сравнению с его поворотом на пути в одном направлении. Поэтому можно осуществить такое устройство (рис. 2): николю 1 наклонен под углом 45° к горизонтальной плоскости, николю 2 — горизонтален, направление магнитного поля таково, что вращение плоскости поляризации происходит по стрелке на угол 45° при прохождении света от одного николя к другому (и притом в силу указанного свойства независимо от направления луча). Следовательно, точку *A* будет видно из *B*, а *B* из *A* не видно.

Поэтому Вин видел в этом устройстве способ осуществить *perpetuum mobile* второго рода, возможность осуществить передачу тепла от менее нагретого тела *A* к более нагретому *B* — без компенсации. Исходя из правильности второго начала термодинамики, он думал далее, что должны существовать какие-то еще неизвестные явления, за счет которых происходит компенсация этой передачи тепла к более нагретому телу. Однако Релей показал, что нет надобности искать какие-то неизвестные явления — такие компенсации имеются и вызваны хорошо известным явлением; они были упущены Вино только благодаря недостаточно подробному разбору этого устройства. Таким образом, этот *perpetuum mobile* второго рода работать не будет.

Перейдем к вопросам, связанным с модуляцией света. Если прерывать монохроматический свет или как-либо менять его амплитуду, то получающееся после этого колебание можно представить в виде

$$f(t) \cos vt.$$

Эту функцию всегда можно разложить на сумму незатухающих синусоидальных колебаний. Это математическая теорема. Вопросы и парадоксы возникают тогда, когда спрашивают, реальны ли эти слагаемые.

Опыты с модуляцией света делались при помощи конденсатора Керра. В этом случае получающиеся колебания таковы:

$$(1 + k \cos \omega t) \cos vt = \cos vt + \frac{k}{2} \cos (v + \omega) t + \frac{k}{2} \cos (v - \omega) t,$$

где v — частота света, а ω — частота модуляции. Что значит «реальность отдельных членов» этой суммы? Это значит, что модулированный свет будет вести себя так же, как свет от трех монохроматических источников соответствующей частоты. Но вести себя можно по отношению к чему-либо, в данном случае — по отношению к исследующему этот свет прибору. Если взять дифракционную решетку (или другой спектральный прибор) достаточной разрешающей способности, то мы не сможем отличить модулированный свет и свет от трех таких источников. Следовательно, отдельные слагаемые разложения реальны.

Если это разложение реально, то возникает такой парадокс. Пусть источник начал светиться при $t = 0$. Световые колебания мы можем разложить на сумму монохроматических, т. е. синусоидальных, колебаний, длящихся от $t = -\infty$ до $t = +\infty$ (разложение в ряд или интеграл Фурье). Возьмем спектральный прибор большой разрешающей силы, например остро настроенный резонатор. Он выделит монохроматические колебания, и, следовательно, мы обнаружим световые колебания и до того момента, когда источник начал светиться. Это абсурд. Тогда такие разложения нереальны.

На подобных же вещах основан известный парадокс с аномальной дисперсией и принципом относительности.

К этой же группе вопросов относится парадокс, указанный Эйнштейном. Пусть мимо щели пролетает светящаяся частица, излучающая монохроматический свет частоты ν , и мы наблюдаем сквозь щель посылаемый ею свет при помощи спектрального прибора (рис. 3). Если T — время пролета частицы мимо щели и если момент $t = 0$ соответствует положению частицы посередине щели, то световое поле за щелью будет

$$f(t) = 0, \quad |t| > \frac{T}{2},$$

$$f(t) = \sin \nu t, \quad |t| < \frac{T}{2}.$$

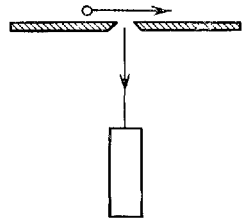


Рис. 3

Свет за щелью будет не монохроматический, колебания в нем можно разложить в интеграл Фурье. Можно показать, что его спектр будет заключаться приблизительно в пределах частот $\nu - \frac{1}{T}$, $\nu + \frac{1}{T}$. Эйнштейн считал, что с точки зрения представления о световых квантах излучение света происходит мгновенно в виде монохроматического кванта и, следовательно, за щелью спектр должен быть узкий и указанного его размытия не должно быть. Этот опыт Эйнштейн считал своего рода *experiments crucis* — волны или кванты. Опыт был сделан, и было обнаружено уширение линии.

Однако Бор указал, что и с точки зрения световых квантов уширение линии должно быть.

Дело в том, что благодаря дифракции будет свет, направленный в бок (не перпендикулярно плоскости щели), излученный частицей в направлении, не перпендикулярном направлению ее движения. Следовательно, будет эффект Доплера, а значит, будет и размытие линии. Подсчет показывает, что количественно отсюда получается ширина линии приблизительно такая же, как и из волнового представления.

Все это верно. Нехорошо только то, что и с волновой точки зрения есть и дифракция и эффект Доплера, а значит, и вызванное

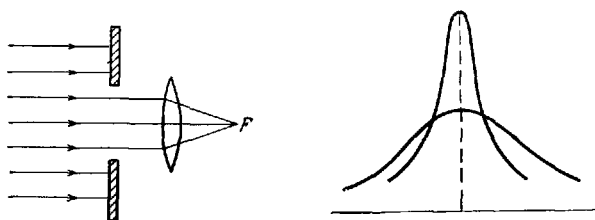


Рис 4.

ими уширение линии должно содержаться в классическом волновом рассмотрении явления. Но в классическом представлении явления, кроме того, есть вызванная прерыванием немонахроматичность, для которой нет соответствующего явления при квантовом представлении. Этот парадокс проистекает из учета одного и того же явления два раза — это часто встречающийся тип парадокса. Мы увидим, что прерывание или дифракция плюс доплер-эффект — это одно и то же.

«Световые биения» Риги — тоже недоразумение, связанное с этими же вопросами.

Перейдем теперь к группе вопросов из области теории дифракции. Эти вопросы играют роль и в оптике, и в акустике, и в волновой механике. Мы займемся ими в первую очередь.

Пусть имеется экран с отверстием, против которого помещена линза. Если удвоить площадь отверстия, то, по принципу Гюйгенса, амплитуда в фокусе должна удвоиться, и, следовательно, интенсивность учетверится. Однако ясно, что поток энергии через отверстие должен только удвоиться. Разрешение парадокса состоит в том, что понятие потока энергии через точку (фокус) лишено смысла. Нельзя отвлекаться от дифракции. Благодаря дифракции свет будет не только в фокусе линзы, но и в известной области вокруг него. При увеличении площади отверстия вдвое амплитуда в фокусе увеличится вдвое, но область, в которой распределена энергия в фокальной плоскости, уменьшится как раз настолько, что полный поток энергии через фокальную плоскость лишь удвоится. Таким образом, в этой задаче, даже при сколь угодно большом отверстии, нельзя ограничиться применением геометрической оптики, нельзя пренебрегать дифракцией.

В заключение укажу еще на один квантовомеханический парадокс.

Пусть мы определяем координату электрона x , проходящего через отверстие в экране. Неточность в определении x -координаты, Δq , равна, очевидно, ширине отверстия. Из-за дифракции получится неточность в определении x -компоненты импульса p , равная

$$\Delta p = p \sin \varphi,$$

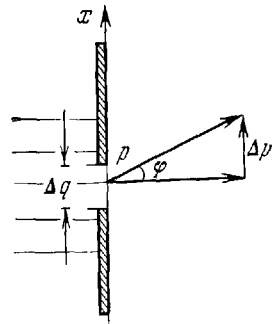


Рис. 5

где φ — угол дифракции. Таким образом, $|\Delta p| < p$. В то же время ширину щели Δq можно сделать как угодно малой. Это, очевидно, противоречит соотношению неопределенностей

$$\Delta p \Delta q \geq h.$$

Мы увидим, что и это противоречие только кажущееся.