

надкрыльев жука *Plusiotis resplendens* оказалась равной отражательной способности оловянной фольги, а по внешнему виду жук этот едва отличается от латуни». Физические причины этого явления еще не вполне ясны, хотя им много занимались такие физики, как Релей и Майкельсон.

### § 41. Давление света. Опыты Лебедева

До сих пор мы говорили только об э н е р г и и световой волны. Однако из электромагнитной теории света следует, что электромагнитная волна, кроме энергии, обладает еще и м п у л ь с о м. Отсюда вытекает, что световые волны, освещающие какое-либо тело, оказывают на него давление, т. е. сообщают ему импульс.

При полном поглощении света телом, очевидно, световые волны просто отдают ему свой импульс. При полном отражении света от тела, очевидно, так же как в случае удара упругого шара, световая волна сообщит телу удвоенный импульс.

Существование светового давления с необходимостью вытекает также из любой корпускулярной теории света как результат ударов световых частиц о поверхности освещаемого тела. Поэтому еще со времен Кеплера световое давление привлекалось к объяснению формы хвостов комет. Однако старая теория истечения давала неверное значение для величины светового давления. В волновой теории света эффект давления становится гораздо менее очевидным, и характерно, что этот эффект до появления электромагнитной теории вообще не обсуждался с волновой точки зрения. Объясняется это тем, что в волновой теории световое давление принадлежит к числу довольно тонких квадратичных эффектов, пропорциональных квадрату амплитуды световой волны.

Интересно отметить, что вопрос о существовании звукового давления был разобран теоретически Релеем только после того, как вопрос о световом давлении был выяснен до конца. Максвелл на основании электромагнитной теории вычислил величину светового давления. Однако его расчет носил очень абстрактный и не вполне строгий характер и поэтому не сразу получил общее признание.

Для случая давления света на проводящее тело можно дать наглядное представление о причине возникновения силы светового давления. Входящая в тело световая волна приводит своим электрическим полем  $E$  в движение свободные электроны, в результате чего в теле возникают электрические токи. Направление этих токов параллельно напряженности электрического поля  $E$  световой волны, т. е. перпендикулярно к направлению распространения волны. Но вместе с электрическим полем в тело входит и магнитное поле  $H$  световой волны, которое выталкивает вперед тело с электрическими токами в нем (т. II, гл. XI, 1959 г.; в пред. изд. гл. IX) совершенно так же, как это происходит в любом электромоторе.

Сила, действующая на проводник с током, пропорциональна величине тока и напряженности магнитного поля  $H$ . Но величина тока в данном случае пропорциональна  $E$  световой волны, следовательно, световое давление пропорционально  $EH$  (или  $E^2$ ; § 2), т. е. величине вектора Умова — Пойнтинга.

Точный расчет приводит к простому соотношению: *величина светового давления в динах на  $1 \text{ см}^2$  при перпендикулярном падении лучей на тело численно равна объемной плотности радиации, выраженной в эргах.*

Если на  $1 \text{ см}^2$  поверхности в  $1 \text{ сек}$  падает  $\mathcal{E}$  эргов лучистой энергии, то объемная плотность излучения в падающем потоке будет  $\rho = \frac{\mathcal{E}}{c}$ , где  $c$  — скорость света. Пусть тело имеет коэффициент отражения  $r$ ; тогда за счет отраженного потока плотность излучения у поверхности возрастет и станет равной  $\rho(1+r)$ . В результате световое давление

$$p = \frac{\mathcal{E}(1+r)}{c}.$$

Численное значение давления весьма мало. Так, черная поверхность, освещенная перпендикулярными солнечными лучами, испытывает давление всего около  $0,48 \text{ мг}$  на квадратный метр. Световое давление было впервые обнаружено в 1900 г. опытами П. Н. Лебедева, подтвердившими предсказания электромагнитной теории света.

Опыты Лебедева — блестящий образец экспериментального искусства, поэтому мы на них остановимся несколько подробнее.

Рис. 154, взятый из работы Лебедева, показывает расположение приборов. Свет вольтовой дуги  $B$  при помощи конденсора  $C$  собирался на металлической диафрагме  $D$ . Выходящий из диафрагмы расходящийся пучок лучей при помощи линзы  $K$  делался параллельным. Затем этот параллельный пучок отражался последовательно от зеркал  $S_1, S_2, S_3$  и линзой  $L_1$  собирался в центре стеклянного баллона  $R$ . Зеркала  $S_1$  и  $S_4$  были укреплены на салазках, и, если салазки сдвигались вправо, зеркало  $S_4$  становилось на место  $S_1$ , пучок света шел по пути  $S_4 S_5 S_6 L_2$  и входил в баллон уже с противоположной



Петр Николаевич Лебедев (1866—1912).

стороны. В центре баллона, из которого был откачан воздух, на тонкой стеклянной нити подвешивался прибор, изображенный на рис. 155. Кружки 1—7 были сделаны из платины, алюминия и слюды толщиной 0,02—0,1 мм. На этой нити укреплено зеркальце для наблюдения поворота системы. Затем вызывались колебания всей подвешенной системы вокруг вертикальной оси и наблюдались поло-

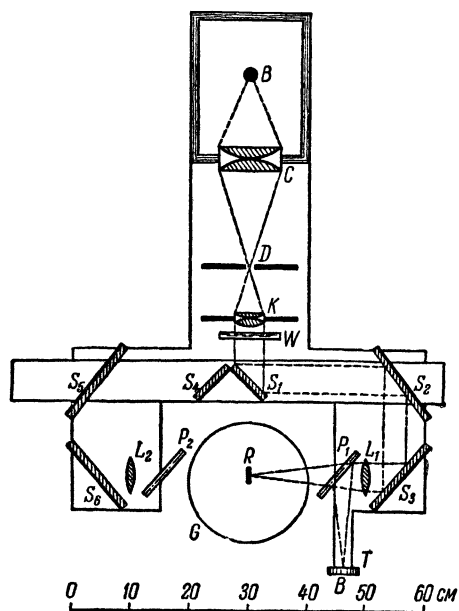


Рис. 154. Схема опыта Лебедева.

жения равновесия системы (середины между двумя максимальными отклонениями) при освещении слева и при освещении справа одного из кружков. Смещение положения равновесия при изменении направления освещения вызвано световым давлением на кружок. Это давление сообщает определенный вращательный момент системе и тем самым закручивает стеклянную нить. При изменении направления освещения изменяется и направление закручивания. Из величины закручивания уже легко вычислить силу светового давления, действующего на кружок. Вся конструкция подвесного прибора была так обдумана, что свет практически оказывал действие только на освеща-

емый кружок. В частности, кружки были подвешены на чрезвычайно тонких платиновых нитях (0,05 мм).

Трудность этих опытов заключалась в малости сил светового давления, благодаря чему их действие легко перекрывалось действием ряда других факторов. Наиболее существенные из них — конвекционные токи в остатках газа, наполняющих баллон, и радиометрические силы. Радиометрический эффект, открытый Круксом, заключается в том, что пластинка, освещенная с одной стороны светом, благодаря неодинаковой температуре своих поверхностей испытывает неодинаковое с обеих сторон давление газа. Давление больше с той стороны, где пластинка теплее, так как там и газ нагрет сильнее (обычно с освещенной). Этот эффект пропорционален толщине пластинки и для толстых пластинок значительно больше светового давления. Лебедев, применяя пластинки разной толщины, исключил радиометрический эффект и получил надежные результаты.

Сила, действующая на освещенное тело, в результате светового давления будет, очевидно, убывать с уменьшением поверхности тела.

Рассмотрим сферическую частицу, входящую в состав хвоста кометы; на нее будут действовать при прохождении около Солнца две силы: притягивающая и отталкивающая — сила тяготения и сила светового давления. С уменьшением размеров частицы сила тяготения убывает пропорционально объему частицы, т. е. как куб ее радиуса. Сила светового да-

вления убывает как поверхность частицы, т. е. пропорционально квадрату ее радиуса. Для больших тел сила тяготения, конечно, значительно больше силы светового давления, но мы видим, что с уменьшением размеров вторая сила убывает медленнее первой. При некотором размере они уравниваются друг друга, а при дальнейшем уменьшении сила светового давления становится даже больше силы тяготения. В результате мелкие частицы, составляющие хвост кометы, отбрасываются от Солнца солнечным светом; поэтому хвост кометы направлен всегда от Солнца.

Обычно недооценивают силу светового давления по сравнению с силой тяготения.

Сила светового давления действительно очень мала, когда речь идет о взаимодействии таких тел, как Солнце и Земля. Но если подсчитать силу лучистого отталкивания двух яблок (за счет их собственного теплового излучения), то окажется, что она примерно равна силе их ньютоновского притяжения.

П. Н. Лебедев чрезвычайно изящным опытом показал, что свет оказывает заметное давление даже на отдельные молекулы газа.

На рис. 156 изображена упрощенная схема этого опыта. В куске металла сделаны два сообщающихся канала  $L_1L_2$  и  $K_1K_2$ . С обеих сторон каналы закрыты прозрачными пластинками. Луч света, проходящий вдоль канала  $L_1L_2$ , давит на молекулы газа и гонит их от  $L_1$  к  $L_2$ ; в результате в канале возникает разность давлений. Эта разность давлений выравнивается через канал  $K_1K_2$ , где газ двигается от  $K_2$  к  $K_1$ . В канале помещен легкий поршень  $B$ , прикрепленный к коромыслу с противовесом  $Z$ . Это коромысло в средней точке  $O$

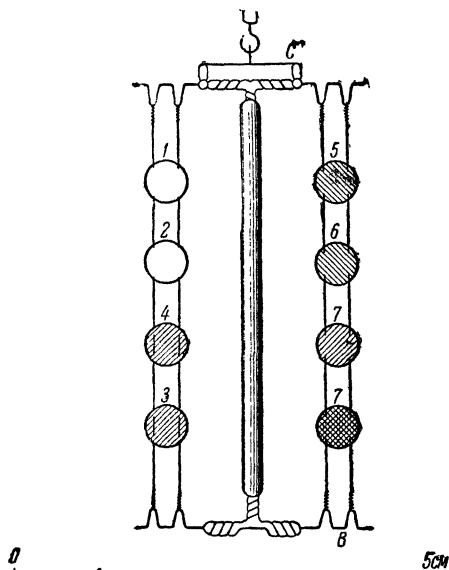


Рис. 155. Вращающаяся часть прибора Лебедева.

подвешено на тонкой нити, перпендикулярной к плоскости чертежа. Движущийся газ давит на поршень  $B$  и закручивает нить. По закручиванию нити можно вычислить давление света на молекулы газа.

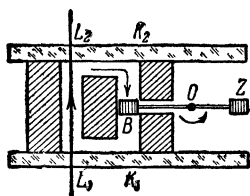


Рис. 156. Схема прибора Лебедева для измерения давления света на газы.

Лебедев установил, что свет оказывает заметное давление только на газы, поглощающие свет (невидимые части спектра), — бутан, углекислоту, ацетилен и т. д. Давление света оказалось для углекислоты равным примерно  $10^{-6}$  дин на  $1 \text{ см}^2$ , что превосходно совпадает со значением, рассчитанным на основании электромагнитной теории.

Эти опыты были исключительно трудны. Лебедев пишет: «Позволю себе заметить, что и настоящая работа заняла более трех лет времени, в течение которых было построено и исследовано более 20 поршневых приборов разных типов».

Значение опытов Лебедева очень велико и не исчерпывается просто подтверждением электромагнитной теории света. Установленное в этих опытах наличие механического импульса света существенно для решения вопроса об инертной массе света и для решения более общей проблемы пропорциональности массы и энергии (§ 78).

## § 42. Дисперсия. Опыты Ньютона

Примерно в 1666 г. Ньютон произвел следующий простой, но чрезвычайно важный опыт (рис. 157): «Я взял продолговатый кусок толстой черной бумаги с параллельными сторонами  $DHIE$  и разделил его на две равные половины линией  $FG$ . Одну часть я окрасил красной краской, другую — синей. Бумага была очень черной, краски были интенсивными и наносились толстым слоем для того, чтобы явление могло быть более отчетливым. Эту бумагу я рассматривал сквозь призму  $ABC abc$  из массивного стекла, стороны которой были плоскими и хорошо полированными.

Рассматривая бумагу, я держал ее и призму перед окном  $MN$ ... Стена комнаты за призмой, под окном, была покрыта черной материей, находившейся в темноте; таким образом, от нее не мог отражаться свет, который, проходя мимо краев бумаги в глаз, смешивался бы со светом от бумаги и затемнял бы явление. Установив предметы таким образом, я нашел, что в том случае, когда преломляющий угол призмы  $BAC$  повернут кверху, так что бумага кажется вследствие преломления приподнятой (изображение  $dgfe$ ), то синяя сторона  $dg$  поднимается преломлением выше, чем красная  $fe$ . Если же преломляющий угол призмы повернут вниз и бумага кажется опустившейся вследствие преломления (изображение  $\delta\upsilon fe$ ), то синяя часть  $\delta\upsilon$  окажется несколько ниже, чем красная  $fe$ .