

# Лебедевские крылышки

**А. ВАСИЛЬЕВ**

**П**ЕТР НИКОЛАЕВИЧ ЛЕБЕДЕВ вошел в историю науки как блестящий физик-экспериментатор, выполнивший ряд тончайших исследований на грани технических возможностей своего времени. Он создал первую в России физическую лабораторию, где вместе с ним трудились его ученики, многие из которых стали впоследствии основателями новых направлений в российской физике.

Лебедев родился в Москве 8 марта 1866 года в обеспеченной купеческой семье, где любили и спорт, и музыку, и литературу. Вместе с тем уже в школьном возрасте обнаружился особый интерес Лебедева к технике, к самостоятельному научному творчеству.

Окончив немецкую коммерческую школу и реальное училище, Лебедев поступил в Московское техническое училище, где овладел столярным, токарным и слесарным ремеслами, которые оченьгодились ему впоследствии при изготовлении экспериментальных приборов. Однако узкая техническая направленность училища вскоре перестала удовлетворять Лебедева, и в 1887 году он отправился на обучение в Страсбургский университет. Здесь он в течение четырех лет слушал лекции Кундта, Гельмгольца, Больцмана и других известных ученых и одновременно вел самостоятельную исследовательскую работу. Молодой ученый пробовал свои силы в разных областях физики. Кундт в шутку говорил, что у Лебедева каждый день рождается по двадцать идей. В конечном счете Лебедев решил сосредоточиться на проблемах взаимодействия электромагнитного излучения с веществом и даже сформулировал собственную программу исследований. Одно из центральных мест в ней занимал вопрос о давлении света на твердые тела и газы.

Проблема светового давления занимала крупнейших ученых мира

(Кеплер, Ньютон, Эйлер, Максвелл, Бартоли, Больцман) на протяжении нескольких столетий. В 1873 году Максвелл опубликовал свой знаменитый «Трактат по электричеству и магнетизму», где дал полное математическое описание электромагнитных явлений и предсказал новый эффект – существование в свободном пространстве электромагнитных волн, распространяющихся со скоростью света. Это позволило ему считать свет одним из видов электромагнитных волн и записать формулу для светового давления в виде:  $p = E(1 + R)/c$ , где  $E$  – энергия электромагнитной волны, отнесенная к единице площади и единице времени,  $R$  – коэффициент отражения,  $c$  – скорость света. Однако многие ученые, и в их числе президент Лондонского Королевского общества лорд Кельвин, считали световое давление несуществующим. Последнее слово могли сказать только экспериментаторы. Попытки экспериментально обнаружить световое давление предпринимались неоднократно, но ни один опыт не дал однозначного ответа на вопрос о существовании светового давления. Даже Максвелл, автор приведенной выше формулы, сомневался в том, что она может быть подтверждена опытным путем.

Полностью осознавая трудность поставленной перед ним задачи, Лебедев приступил к выполнению своей программы исследований взаимодействия излучения и вещества.

Будучи уже твердо уверенным в том, что свет, являясь электромагнитной волной, должен оказывать давление на твердые тела и газы, Лебедев начал свои знаменитые опыты. Идея эксперимента была проста: на легкое крылышко, подвешенное на длинной и тонкой нити, направлялся луч света. Под действием светового давления крылышко должно поворачиваться, и по углу поворота можно будет рассчитать силу давления света. Прибор необходимо было

поместить в хорошо откачанный баллон, чтобы исключить посторонние воздействия.

На пути осуществления этой простой идеи экспериментатора, однако, ожидали колоссальные трудности. Первая из них состояла в ничтожной величине светового давления. Действительно, используя формулу Максвелла, легко оценить, что, например, дуговая лампа мощностью 1 кВт создает световое давление порядка  $10^{-4}$  Па, или  $10^{-6}$  мм рт. ст. Вакуум в экспериментах Лебедева составлял около  $10^{-4}$  мм рт. ст., т.е. ему необходимо было фиксировать изменения давления на уровне процента от давления остаточного газа в баллоне. Но малость измеряемой величины была не самым большим препятствием. Определяя давление света, Лебедев столкнулся с действием радиометрических сил, существенно влиявших на сам процесс измерений. Эти силы возникали из-за того, что поверхность крылышка, обращенная к источнику света, нагревалась, что приводило к неравномерному нагреванию газа в баллоне и, тем самым, к возникновению конвекционных потоков. Поток газа от освещенной стороны крылышка к теневой толкал крылышко в том же направлении, что и световое давление. Помимо этого, нужно было избавиться от конвекционных потоков, возникавших из-за неравномерного нагревания светом стеклянного баллона.

Исключить все указанные помехи и измерить величину, которую можно однозначно отождествить с давлением света, – вот задача, на решение которой Лебедев затратил четыре года упорнейшего труда. Ученый создал прибор, удивительный по своей простоте, элегантный и безупречный с точки зрения чистоты физического эксперимента.

Прежде всего, конечно, надо было научиться создавать хороший вакуум в стеклянном баллоне. Лебедев

поместил в баллон каплю ртути и, слегка подогревая ее, продолжал откачивать воздух из баллона самым совершенным по тому времени вакуумным насосом – тяжелые пары ртути увлекали молекулы воздуха при откачке. Затем баллон охлаждался, и плотность паров ртути понижалась, благодаря чему достигался довольно высокий вакуум. Для того чтобы конвекционные потоки остаточного газа от нагретой стенки рассеивались еще до того, как они достигнут крылышка, Лебедев увеличил размер баллона до 20 см в диаметре. Кроме того, ему удалось уменьшить нагревание стенки баллона светом за счет применения светофильтров, поглощавших самую «горячую» часть спектра.

Главной частью созданного им прибора были знаменитые крылышки. В одной из конструкций к стеклянному стержню были прижаты платиновыми кольцами два крестика из листовой платины различной толщины. Два из этих крылышек имели с обеих сторон зеркальные поверхности, а два других были покрыты платиновой чернью, т.е. мелко раздробленной платиной. Диаметр крылышек составлял 0,5 см, а весь прибор имел около 2 см в ширину и около 4 см в длину. Прибор подвешивался на тонкой стеклянной нити длиной 30 см. Луч света можно было направлять поочередно на любое из четырех крылышек. Крылышки делались зеркальными и зачерненными с тем, чтобы проверить вывод теории о том, что при полном отражении от поверхности свет оказывает на нее вдвое большее давление, чем при полном поглощении.

Источником света в установке служила дуговая лампа. Пропуская луч через систему линз и металлическую диафрагму, получали параллельный пучок, который направлялся на сосуд с чистой водой. Вода служила светофильтром, поглощавшим «горячие» лучи. Параллельный пучок света трехкратно отражался от зеркал, фокусировался линзой, проходил через стеклянную пластину и направлялся на крылышки, помещенные в стеклянный баллон. С помощью зеркал можно было менять направление светового луча так, чтобы он падал с противоположной стороны крылышка. А освещение крылышка с разных сторон позволяло

компенсировать конвекционные потоки.

Лебедев тщательно следил за тем, чтобы интенсивность освещения была одинаковой с обеих сторон. Было замечено, что разница в яркости в 1% «вызывается несимметричным смещением пыли» с установки. Для исключения радиометрических поправок Лебедев применял крылышки разной толщины. Он писал: «Если мы будем одновременно наблюдать два одинаковых крылышка, имеющих очень значительную разницу толщин, то мы можем вычислить, как велико было бы отклонение, вызываемое световым пучком, если бы толщина крылышка была равна нулю, что соответствует и равным нулю радиометрическим силам». Особые меры предпринимались им для того, чтобы отразившийся от крылышек свет, претерпевая повторные отражения от внутренней стенки баллона, не попадал вновь на крылышко. Более того, Лебедев исключил даже вклад в измеряемые эффекты от «корешков» крылышек, с помощью которых они крепились к стеклянному стержню: во втором варианте прибора крылышки крепились на очень тонких проволочках, давлением света на которые уже можно было пренебречь. Наконец, наибольшие помехи в процесс измерений вносила неравномерность горения дуговой лампы. Это препятствие преодолевалось путем накопления статистики при проведении большого числа экспериментов.

Из теории Максвелла следовало, что сила давления света пропорциональна энергии светового луча. Значит, необходимо было измерить энергию лучей, падающих на крылышки. Помещая на место крылышек медный калориметр, Лебедев измерял изменение температуры калориметра под действием света. Считая затем, что вся световая энергия превращалась в тепло, и зная теплоемкость калориметра, можно было вычислить энергию световых лучей. Коэффициент отражения каждого крылышка тщательно измерялся. Зная коэффициент упругости прибора (который определялся из собственных колебаний массивного медного цилиндра, подвешенного на стеклянной нити) и угол, на который закручивался прибор под действием светового давления, можно было определить давление света.

Таким образом, Лебедев измерил все величины, входящие в формулу Максвелла, и полученные им экспериментальные данные в пределах точности измерений ( $\pm 20\%$ ) совпали с теоретическими расчетами.

Летом 1900 года Лебедев доложил результаты своей работы на Всемирном конгрессе физиков в Париже, и его исследования получили заслуженное признание. Лорд Кельвин в беседе с физиологом Тимирязевым говорил: «Вы, может быть, знаете, что я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавая его светового давления, и вот ваш Лебедев заставил меня сдаться перед его опытами».

В дальнейшем Лебедев поставил перед собой еще более трудную задачу – измерить давление света на газы. В том, что такое давление существует, он уже не сомневался. Результатом длительных исследований стала публикация 1909 года, в которой Лебедев сообщал, что «существование давления света на газы установлено опытным путем... Таким образом, гипотеза о давлении света на газы, триста лет тому назад высказанная Кеплером, получила в настоящее время как теоретическое, так и экспериментальное обоснование».

Важность сделанного Лебедевым открытия трудно переоценить. Вот лишь несколько примеров. Ничтожная, на первый взгляд, величина светового давления оказывает существенное влияние на положение искусственных спутников Земли и безусловно учитывается в точной космической навигации. Глубокое охлаждение отдельных атомов и образование конденсата Бозе – Эйнштейна возможно при взаимодействии лазерного излучения с веществом. Калибровка первых лазеров, созданных на физическом факультете МГУ, осуществлялась по световому давлению.

Имя Петра Николаевича Лебедева носят Физический институт Российской академии наук и премия, присуждаемая Президиумом РАН за лучшие работы в области физики. А по улице Лебедева автор этой статьи каждый день идет на физический факультет МГУ.