

П. Н. Лебедев

1866—1912

О давлении света

Идея о существовании давления света была сформулирована очень давно: еще в начале XVII в. И. Кеплер высказал мысль, что форма кометных хвостов объясняется действием на них излучения Солнца. На протяжении XVIII—XIX вв. не раз предпринимались попытки обнаружить давление света с помощью эксперимента; все они, однако, окончились неудачей. Проблема опытного обнаружения давления света стала особенно острой после создания Дж. К. Максвеллом электромагнитной теории света, из которой непосредственно следовало существование этого эффекта. Тщательные опыты выдающегося русского физика П. Н. Лебедева, в которых была измерена величина давления света на твердые тела, стала не только шедевром экспериментального искусства, но и ярким подтверждением теории Максвелла.

Петр Николаевич Лебедев родился 8 марта 1866 г. в Москве в состоятельной семье коммерсанта. Отец его видел в сыне будущего хозяина большого торгового дома. Поэтому мальчик был отдан в коммерческую школу, а затем в реальное училище.

Однако молодой Лебедев чувствовал непреодолимую тягу к науке. Он отверг карьеру предпринимателя и отправился учиться в Страсбург к немецкому ученому А. Кундту — главе школы экспериментальной физики, где стажировались молодые ученые из многих стран мира, в том числе и русские физики А. А. Эйхенвальд, Б. Б. Голицын и др.

В 1891 г. Лебедев успешно заканчивает Страсбургский университет и возвращается в Москву. А. Г. Столетов берет молодого ученого к себе на кафедру в университет, где Лебедев получает возможность ставить эксперименты в хорошо оборудованной лаборатории.

После смерти Столетова Лебедев берет на себя руководство кафедрой. С 1901 г. П. Н. Лебедев — профессор Московского университета. Добившись расширения лаборатории, основанной Столетовым, и преобразовав ее в научно-исследовательский институт, Лебедев стал во главе творческого коллектива, проводившего экспериментальные исследования по акустике, физике

разреженных газов, земному магнетизму. Созданную им научную школу отличали такие черты, как коллективизм, стремление к техническому и методическому совершенству экспериментов, тщательное планирование исследований. Из школы Лебедева вышли П. П. Лазарев, В. К. Аркадьев, С. И. Вавилов, Т. П. Кравец, А. К. Тимирязев, А. Б. Млодзеевский и др.

В 1911 г. Лебедев в расцвете творческих сил вынужден был подать в отставку вместе с другими прогрессивными преподавателями Московского университета в знак протеста против попыток царского правительства нарушить автономию университета. Для Лебедева принятие этого решения было актом большого гражданского мужества, ибо с уходом из университета он лишался лаборатории и, следовательно, возможности продолжать научные исследования. И хотя ему была предоставлена возможность создать (на частные средства) новую лабораторию в городском университете им. А. Л. Шанявского, полностью оправиться от событий 1911 г. ученый не смог. Лебедев умер от болезни сердца 14 марта 1912 г.

Еще находясь в Страсбурге, Лебедев составил план основных исследований, которого придерживался всю жизнь. Он решил посвятить себя актуальной тогда проблеме пондеромоторных проявлений волн различной природы, в том числе электромагнитных.

В 1895 г. ученый публикует исследование «О двойном преломлении электрической силы», которое свидетельствует о его глубоком интересе к электромагнитной теории света Максвелла и опытам Герца. Уже в этой работе проявился талант Лебедева как экспериментатора. Он создает установку, позволяющую генерировать электромагнитные волны с рекордно короткой длиной волны 6 мм. С помощью этих волн он проводит все основные опыты Герца и дополняет их экспериментами по поляризации.

Лебедев стремился выяснить механизм молекулярного взаимодействия, отождествляя молекулу с электромагнитным вибратором. Изучив действие электромагнитных волн на электрический резонатор, он приступил к изучению механических действий гидродинамических волн, а затем и звуковых. Им были установлены общие закономерности пондеромоторных действий (взаимного притяжения или отталкивания резонатора и вибратора в зависимости от соотношений их частот) всех трех типов волн. Эти исследования были необходимым этапом в достижении конечной цели Лебедева — обнаружения и измерения давления света.

Впервые результаты работы П. Н. Лебедева по световому давлению на твердые тела были обнаружены в августе 1900 г., когда на Всемирном конгрессе физиков в Париже Лебедев сделал доклад о своих экспериментах. Дополненный текст доклада в виде статьи был напечатан в 1901 г. в журнале «Annalen der Physik» под названием «Опытное исследование светового давления». Работа Лебедева была сразу же очень высоко оценена в международных научных кругах. Так, известный немецкий физик-

экспериментатор Ф. Пашен писал Лебедеву: «Я считаю Ваш результат одним из важнейших опытов, тем более что я сам несколько времени назад задался целью доказать световое давление и проделывал подобные же опыты, которые, однако, не дали положительного результата».

Успех окрылил ученого, и он взялся за решение еще более трудной задачи — определить давление света на газы. Сложность опытов состояла в том, что и без того слабый эффект в случае давления на газы уменьшался еще на два порядка (по сравнению с давлением на твердые тела). Кроме того, конвекционные потоки, неизбежно возникающие в газах, создают дополнительные трудности, которых можно избежать при проведении экспериментов с твердыми телами в вакуумированных сосудах. Лебедеву удалось преодолеть все трудности и в 1909 г. завершить исследование. За свои экспериментальные работы Лебедев был избран почетным членом Королевского института Великобритании.

Опытное исследование светового давления

Развивая основные положения электромагнитной теории света, Максвелл (1873) обратил внимание и на те силы, которые являются нам в виде пондеромоторных сил во всякой магнитно- или электрически-поляризованной среде; из его теории неизбежно следует необходимость существования этих сил также во всяком пучке лучей, и Максвелл говорит: «В среде, в которой распространяется волна, появляется в направлении ее распространения давящая сила, которая во всякой точке численно равна количеству находящейся там энергии, отнесенной к единице объема». <...>

Бартоли (1876) пришел к тождественному выводу, следуя по совершенно иному пути и, видимо, не зная указанного Максвеллом свойства луча, Бартоли указывает круговые процессы, которые должны бы дать возможность при помощи подвижных зеркал переводить лучистую энергию от более холодного тела к более теплomu, и вычисляет ту работу, которую надо затратить в этом случае согласно второму закону термодинамики. Необходимость затрачивать работу при передвижении зеркала навстречу падающему лучу заставляет предположить, что падающий луч давит на зеркало. Бартоли вычислил величину этого давления; результат, им полученный, совершенно совпадает с результатом, полученным Максвеллом.

Если пучок параллельных лучей падает отвесно на плоскую поверхность, то величина максвелло-бартолиевского давления определяется количеством падающей в секунду энергии E , коэффициентом отражения поверхности и скоростью распространения луча v ; тогда

$$p = \frac{E}{v}(1 + \rho),$$

где ρ заключено между 0 в случае абсолютно черной и 1 в случае абсолютно отражающей поверхности.

Величина этого давления лучей весьма мала. Как Максвелл, так и Бартоли вычислили, что лучи Солнца, падая отвесно на плоскую поверхность 1 м^2 , должны производить давление, которое в случае черной поверхности равно 4 мг, а в случае зеркала — 0,8 мг. <...>

Максвелло-бартолиевы силы давления лучей могут со временем получить большое значение в вопросах физики и астрономии, а потому опытное исследование этих сил является тем более желательным, что теоретические обоснования их как по Максвеллу, так и по Бартоли опираются на определенные элементарные свойства поглощающих и отражающих поверхностей, и потому может возникнуть вопрос, действительно ли только этими элементарными свойствами поверхностей обусловлены силы давления и в случае световых лучей. Этот вопрос может быть разрешен только при помощи дополнительных исследований; самым прямым путем является непосредственный опыт. <...>

II. Расположение опытов и приборы

Как ни просто максвелловское расположение опыта, оно встречается, однако, два существенных затруднения, обусловленных, с одной стороны, *конвекционными токами*, а с другой — *радиометрическими силами*. При самых высоких разрежениях эти побочные силы значительно уменьшаются, но с ними все-таки приходится считаться при измерениях светового давления.

Возникновение конвекционных сил обусловлено тем, что при нагревании крылышка прибора падающими на него лучами одновременно нагреваются и прилегающие слои газа, благодаря чему образуется восходящее течение; если плоскость крылышка хоть немного наклонена по отношению к вертикали, то восходящее течение заставляет крылышко перемещаться, причем направление и величина этого перемещения зависят только от степени нагревания и не зависят от направления, по которому падают нагревающие лучи. Эти силы можно исключить при измерениях, заставляя лучи того же источника попеременно падать то с одной, то с другой стороны крылышка.

Что касается радиометрических сил, то они были сведены при моих опытах до возможного минимума тем, что был взят весьма большой стеклянный баллон ($D = 20 \text{ см}$), при помощи соответствующего светофильтра были исключены все лучи, которые могли бы быть поглощаемы стенками баллона, крылышки были сделаны из тонкого металла, для того чтобы разница температур обеих поверхностей была по возможности мала, и разрежение было доведено (при помощи ртутного насоса и последую-

щего охлаждения охлаждающей смесью) до возможно высокой степени.

Когда радиометрические силы малы, то вызываемую ими поправку при измерении светового давления можно вычислить на следующих основаниях: радиометрические силы обусловлены разницей температур освещенной и неосвещенной поверхностей крылышка, причем для двух равновеликих крылышек из одинакового материала и имеющих одинаковые свойства поверхностей эти силы прямо пропорциональны *толщинам** крылышек; если мы будем одновременно наблюдать два одинаковых крылышка, имеющие 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 радиометрическим силам, равным нулю. Я позволю себе здесь же заметить, что эту поправку пришлось делать только для платинированных крылышек. У крылышек с зеркальными поверхностями радиометрические силы были, против ожидания, настолько малы, что исчезали в неизбежных ошибках наблюдений, обусловленных другими причинами.

Помимо приведенных выше, по своей природе известных побочных сил, можно указать еще и на возможную гипотезу, что открытое Ленардом и Вольфом распыление освещенных тел может сопровождаться заметными реакционными силами, которые являются неизбежными спутниками максвелло-бартолиевых сил давления света. Эти гипотетические добавочные силы должны, однако, зависеть как от длины падающего света, так и от химической природы крылышка; приведенные ниже опыты с цветными светофильтрами и с разными крылышками не дали возможности обнаружить сколько-нибудь заметного действия этих гипотетических реакционных сил.

Общее расположение приборов было следующее [рис. 116, план]: изображение кратера *B* (+) угля дуговой лампы (30 А) собиралось при помощи конденсатора *C* на металлическую диафрагму *D* ($d = 4$ мм). Выходящий из диафрагмы расходящийся пучок лучей падал на линзу *K* и шел дальше параллельным пучком; для того чтобы освободить этот пучок от ультракрасных лучей, за линзой *K* находился стеклянный сосуд с плоскопараллельными стенками *W*, наполненный чистой водой** (толщина слоя 1 см); для того чтобы изменять окраску лучей, в этом месте можно было помещать добавочное красное («фотографи-

* В моих опытах разница температур между освещенным крылышком и стенками баллона была во много раз больше, чем разница температур между двумя поверхностями самого крылышка. Какой функции первой разницы температур ни соответствует величина радиометрических сил, их пондеромоторное действие на крылышко представляет собой их разность на двух поверхностях крылышка, и эта последняя с достаточной степенью приближения прямо пропорциональна второй разности температур.

** Этим способом исключались все лучи $\lambda > 1,2\mu$; со своей стороны стеклянные линзы задерживают ультрафиолетовые лучи.

ческое») стекло или заменять чистую воду голубым аммиачным раствором медной соли*.

На своем дальнейшем пути пучок параллельных лучей претерпевал трехкратное отражение от стеклянных (амальгамированных) зеркал S_1 , S_2 и S_3 и, собираясь при помощи линзы L_1 , давал действительное увеличенное ($d' = 10$ мм) изображение R диафрагмы D внутри стеклянного баллона; при передвижении двойного зеркала S_1S_4 пучок лучей пробегал аналогичный путь и падал с другой стороны на крылышко, помещенное в стеклянном баллоне. Линзы L_1 и L_2 имели каждая фокусное расстояние 20 см при отверстии 5 см; таким образом, конический пучок света имел угол схождения 15° . Все приспособление с зеркалами было накрепко соединено с фонарем дуговой лампы; этот последний помещался на салазках, при помощи которых его легко было отодвигать от баллона; установочные винты и передвижение на салазках позволяли наводить пучок лучей на исследуемое крылышко.

Оградить результаты наблюдений от влияния тех случайных скачков яркости света, которые неизбежно связаны с вольтовой дугой, возможно было только путем увеличения числа наблюдений. <...>

Для опытов служили три различных прибора [рис. 117] с разными крылышками.

1 прибор [рис. 117, 1] состоял из стеклянного стержня G , к которому были прижаты платиновыми кольцами (без помощи замазки) два креста из листовой платины различной толщины. Для того чтобы крылышки (диаметр = 5 мм) всех приборов сделать равновеликими, их пришлось вырезать стальным штанцем. Два крылышка прибора 1 имели с обеих сторон зеркальные поверхности, два других были с обеих сторон гальванически покрыты платиновой чернью**, причем более толстое крылышко

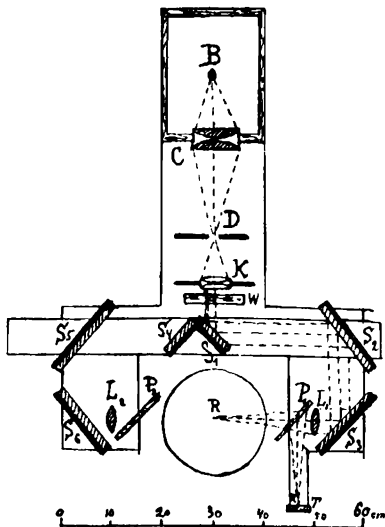


Рис. 116

* При красном, а также при голубом светофильтре количество проходящей световой энергии сокращается до одной пятой белого света; это служит доказательством того, что лучи, с которыми приходилось экспериментировать, почти исключительно принадлежали видимой части спектра.

** См. F. Kurlbaum, Wied. Ann., 67, 848 (1899). Полезно при начале платинирования в течение 30 с непрерывно и сильно двигать крылышко в ванне; поверхность крылышка приобретает слабую, серую, как сталь, окраску. После этого губчатая платина при неподвижной ванне садится на поверхность крылышка очень прочно.

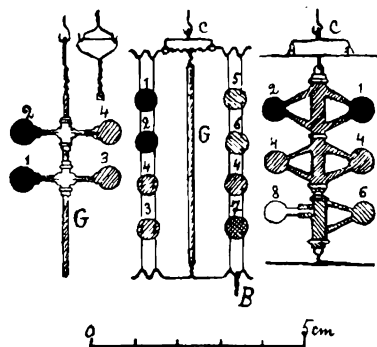


Рис. 117

подвергалось в пять раз более продолжительному платинированию. Для того чтобы подвешивать прибор к крючку крутильной нити, к стеклянному стержню *G* была припаяна платиновая петля *O*. Петля эта лежала в плоскости, перпендикулярной к плоскости крылышек, чтобы при подвешивании стержень устанавливался в плоскости крылышек совершенно свободно.

II прибор [рис. 117, *II*] также состоял из стеклянного стержня, к концам которого были припаяны поперечные платиновые проволоки. Между этими держалами были натянуты тонкие (0,05 мм) платиновые проволоки, которые проходили через маленькие отверстия в металлических крылышках и удерживали крылышки в вертикальной плоскости; эти проволочки были настолько тонки, что их радиометрическими действиями можно было пренебречь. *II* прибор был снабжен кардановым подвесом *C* из платиновой проволоки, при помощи которого он и подвешивался к крючку крутильной нити; добавочный платиновый грузик *B* удерживал стеклянный стержень в вертикальном положении.

III прибор был так же построен, как *I* прибор, с той разницей, что он был снабжен кардановским подвесом. Узкие металлические полоски (ширина 0,3 мм), поддерживающие круглые крылышки, в достаточной мере обеспечивали вертикальное положение последних. Слюдяное крылышко 8 было вставлено в легкую оправу из алюминия. К стеклянному стержню были приделаны сверху и внизу поперечные проволоки из алюминия, для того чтобы при опускании прибора в баллон крылышки не могли ударяться о стенки стеклянной шейки.

Опыты были произведены со следующими крылышками:

Материал

- | | | | | |
|----|--|------|----|---------|
| 1. | Платина, платинированная толстым слоем | | | |
| 2. | Платина, платинированная в пять раз тоньше | | | |
| 3. | Платина металлич. (зеркальн. поверх.), толщина | 0,10 | мм | |
| 4. | Платина | > | > | 0,02 мм |
| 5. | Алюминий | > | > | 0,10 мм |
| 6. | Алюминий | > | > | 0,02 мм |
| 7. | Никель | > | > | 0,02 мм |
| 8. | Слюда, толщина | | | 0,01 мм |

В качестве крутильной нити служила *стеклянная нить* (длина 30 см), которая на нижнем конце несла плоское зеркало и крючок для подвешивания приборов, а сверху была зажата в железном зажиме [рис. 118] внутри ртутного шлифа; чтобы прикрепить нить без помощи замазки, ее концы были зажаты между

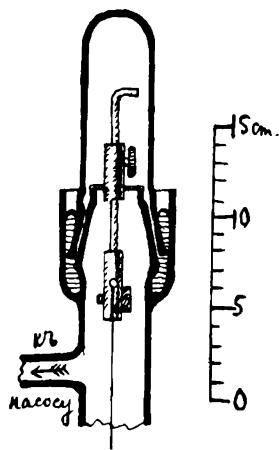


Рис. 118

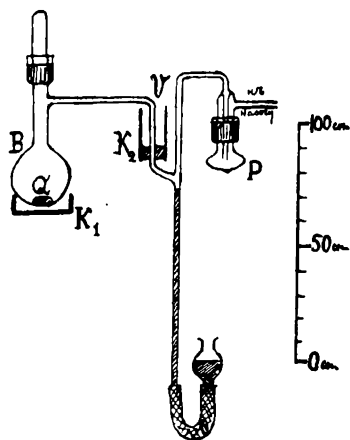


Рис. 119

кусочками прокаленного асбестового картона и эти последние внизу прижаты платиновым кольцом к державе зеркала, а вверху схвачены зажимом.

Зеркало помещалось в платинированной алюминиевой оправе; оно было покрыто (при помощи распыления катода в пустоте) слоем металлической платины, так как серебряные зеркала скоро разъедаются ртутными парами. При сравнительно слабой отражательной способности подобного зеркала и несовершенстве изображения благодаря двойному прохождению луча через стенки баллона освещение шкалы по Велльман — Мартенсу оказалось замечательно удобным.

При определении величины направляющей силы из колебаний на крючок крутильной нити накладывалась медная проволока 4 см длины, масса которой была 0,314 г.

Наблюдения были произведены в трех различными крутильными нитями, направляющие силы которых были так подобраны, что при расстоянии от скалы до зеркала в 1200 делений скалы двойное отклонение при освещении крылышек с зеркальными поверхностями достигало от 40 до 90 делений скалы. При этом периоды одного колебания (в одну сторону) вышеописанных трех приборов были 15, 35 и 13 с.

Разрежение производилось автоматическим насосом Кальбаума, измерения давления промером Мак-Леода-Кальбаума показали, что легко достигаются разрежения, при которых парциальное давление воздуха меньше 0,0001 мм (т. е. меньше $1/15$ давления насыщенных паров ртути при комнатной температуре).

Для того чтобы получить еще большее разрежение, служил следующий прием [рис. 119]; капля ртути Q была помещена на дно стеклянного баллона B , затем воздух разрежался насосом и ртутная капля нагревалась в водяной бане K_1 на 5°C выше

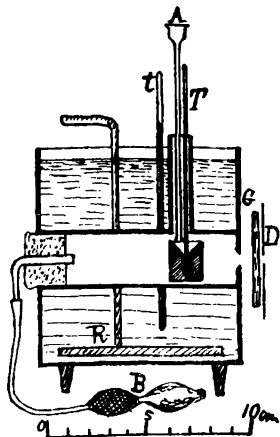


Рис. 120

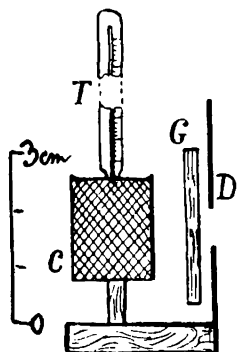


Рис. 121

комнатной температуры; испаряясь, ртуть перегоняется в насос и увлекает с собой остатки воздуха из баллона. Если отделить баллон от насоса и осушителя P при помощи барометрического запора V , то в баллоне останутся только ртутные пары: их давление уменьшится до весьма малой величины, если наполнить сосуды K_1 и K_2 охлаждающей смесью льда и соли.

Энергия падающих на крылышко лучей измерялась калориметрически. Фонарь с зеркалами [рис. 116] отодвигался на салазках от баллона настолько, что крылышко прибора могло быть замещено равной ему по величине ($d = 5$ мм) диафрагмой D [рис. 120 и 121]; все лучи, проходящие через диафрагму, поглощались калориметром. Стеклопластинка G компенсировала ослабление света при отражении от стеклянной стенки баллона; она ставилась между диафрагмой и калориметром, чтобы задерживать тепловое излучение диафрагмы. (...)

III. Опыты

Вышеописанные приспособления позволяют экспериментально решить два основных вопроса:

- 1) производят ли лучи света какое-либо пондеромоторное действие, независимое от известных уже вторичных (конвекционных и радиометрических) сил, и
- 2) соответствуют ли эти новые силы света максвелло-бартолиевым силам давления лучистой энергии. (...)

Приборы с крылышками были всегда так помещены внутри баллона, чтобы лучи источника, проходящие мимо крылышка, отраженные и снова собранные вогнутой стенкой баллона, не падали на части подвешенного прибора.

После того как прибор с крылышками бывал помещен в баллон, начиналось откачивание, продолжавшееся несколько дней, причем последние откачивания производились при подогревании

стенок баллона и при одновременном освещении отдельных крылышек светом дуги. Перед каждой серией наблюдений нижняя часть баллона, где находилась капля ртути, нагревалась в водяной бане на 5°C выше комнатной температуры*, а затем в течение от одного до двух часов снова производилось откачивание, после чего барометрический запор V поднимался и следовало охлаждение строганым льдом и солью.

Самой существенной помехой при производстве измерений являются конвекционные токи; они сказываются в непрерывном ходе нуля, причем как быстрота, так и направление этого хода зависят от случайных условий (даже для одного и того же крылышка в разные дни наблюдений). В течение одной серии наблюдений указанный «ход» нуля бывает обыкновенно настолько незначителен, что, увеличивая число отдельных наблюдений, его легко было исключить. Эта конвекция остатков ртутных паров обуславливается нагреванием освещаемого крылышка, а также случайным внешним неравномерным нагреванием стенок баллона и в особенности неизбежной разницей температур двух охлаждаемых ртутных поверхностей. При наблюдениях без охлаждения колебания, обусловленные конвекцией, сказываются гораздо резче, чем при охлаждении льдом с солью; при более высоких давлениях воздуха наблюдения делаются благодаря конвекции настолько затруднительными, что измерения представляются едва возможными.

Другая причина, вызывающая колебание отсчетов, — это непостоянство вольтовой дуги, которое сказывается и при самых лучших углях. Скачки в яркости дуги сказываются в изменениях (увеличении или уменьшении) отдельных амплитуд колебаний прибора; их возможно исключить только увеличением числа отдельных наблюдений.

При помощи двух труб наблюдатель мог попеременно отсчитывать отклонения прибора с крылышками и гальванометра; помощник, наблюдавший за правильным горением дуги, по команде перемещал двойное зеркало S_1S_4 [рис. 116]. Замыкая освещения с периодическими перерывами, можно довести амплитуду колебаний прибора до нужной величины.

Таблица дает начало одного из протоколов наблюдений.

В этой таблице обозначают:

L_1 и L_2 -- точки поворота на скале, когда свет падал на крылышко прибора от линзы L_1 или от линзы L_2 . Средний ряд, «вычисления», дает вычисленное (из трех прилегающих точек поворота) положение равновесия. «Отклон.» обозначает отклонение системы при изменении направления освещения. G_1 и G_2 дают положения гальванометра в первом и во втором случае (в последнем — нулевую точку его). «Гальваном.» — отклонения

* При указанной малой разнице температур ртуть не осаждается на более холодные стенки прибора; это явление, имеющее место при несмачиваемых поверхностях, было указано М. Сапторгом, Wied. Anp., 56, 493 (1985).

III. прибор. Платинированное крылышко 2.
 Расстояние центра кружка от оси вращения 9,2 мм
 Охлаждение льдом с солью
 Расстояние до скалы $A = 1195$ делений скалы

L_1	L_2	L_1	L_2
Выч. 306	Выч. 115	Выч. 307	Выч. 174
176 240	206 295	184 245	210 244
239 302	118 207	244 303	177 211
177 239	208 296	184 243	212 245
240 302	124 209	243 300	180 213
178	294	189	
240	208	244	212

Отклон. 32 дел. скал. 36 дел. скал. 32 дел. скал.

G_1	G_2	G_1	G_2
308		314	
305	201	312	201
312		314	
314		316	
310		314	

Гальваном. 109 дел. скал., 113 дел. скал., 113 дел. скал.

Отклон. привед.:
 ($G = 100$) 29,3 дел. скал. 31,8 дел. скал., 28,2 дел. скал.

гальванометра. «Отклон. привед. ($G = 100$)» дают вышеобозначенные отклонения прибора, приведенные к постоянному отклонению гальванометра в 100 делений скалы.

Указанным в таблице способом производилось по семь рядовых отсчетов для L_1 и L_2 и из «Отклонений приведенных ($G = 100$)» выводилось среднее с обозначением средних \pm отступлений отдельных наблюдений. (Для крылышка это двойное отклонение $a = (29,4 \pm 1,6)$ дел. шкалы.) (...)

Для того чтобы определить абсолютную величину давления света на крылышко, необходимо было измерить в абсолютной мере величину направляющей силы крутильной нити. Вместо прибора с крылышками к крючку крутильной нити подвешивалось тело (медный цилиндр) с известным моментом инерции, и из трех серий наблюдений, из которых каждая состояла из десяти простых качаний, выводилось среднее время одного качания.

На основании указанной величины направляющей силы мы получаем для крылышка при *одностороннем* освещении величину давления света в динах:

$$p = 0,0000308 \pm 0,0000017.$$

Для того чтобы проверить расчеты Максвелла и Бартоли, необходимо *вычислить* ту величину светового давления, которую следует ожидать при опытах согласно упомянутой теории, и сравнить вычисленную величину с наблюдаемой. Для этого необходимо сделать калориметрическое измерение падающей световой энергии, а также фотометрическое измерение коэффициентов отражения крылышек. <...>

Отсюда получаем количество падающей в течение секунды энергии:

$$E = \frac{1,55 \cdot 3,61 \cdot 4,18 \cdot 10^7}{300} \text{ эрг} = 7,74 \cdot 10^5 \text{ эрг.}$$

При наших опытах лучи падали не параллельным, а сходящимся пучком; их наклон был, однако, так незначителен, что обусловленная им поправка (около 1 %) могла быть опущена ввиду других, гораздо больших неточностей наблюдений. Мы можем, следовательно, производить вычисления по формулам, данным Максвеллом и Бартоли для пучка параллельных лучей.

Для абсолютно черного тела мы получаем на основании калориметрических измерений <...> величину давления p :

$$p \text{ (дин)} = \frac{E \text{ (эрг)}}{3 \cdot 10^{10}} = 0,0000258 \text{ дин.}$$

Для того чтобы полученные результаты выразить в удобно сравниваемых величинах, мы возьмем единицей сравнения величину максвелло-бартолиева давления на *абсолютно черное тело*, вычисленную из калориметрических наблюдений, и назовем эту произвольную единицу единицей МБ.

В этих единицах результаты таблицы выразятся таким образом:

$$p = \frac{0,0000308 \pm 0,0000017}{0,0000258} = (1,19 \pm 0,07) \text{ МБ. } \langle \dots \rangle$$

IV. Результаты

Результаты опытов приведены в единицах МБ; под каждой наблюденной величиной приведено в тех же единицах и среднее колебание в установках приборов, причем все колебания, меньшие 0,15 МБ, обозначены 0,1 МБ; ниже 0,25 МБ обозначены 0,2 МБ и т. д.

Для того чтобы составить себе представление о точности приведенных измерений, могут служить следующие соображения: колебания при установках прибора во время измерений приведены в таблице.

Определение абсолютной величины давящей силы света (куда входят измерения направляющей силы крутящей нити, расстояния от зеркала до скалы и расстояния центра крылышка до оси вращения) возможно было сделать с точностью около ± 8 ; вычисление абсолютной величины МБ единицы из калориметри-

Время простого качания	Медный цилиндр
Одно зеркало $\frac{t_1}{2} = (5,1 \pm 0,05) \text{ с}$	Длина 4,0 см
Зеркало + медный цилиндр	Масса 0,314 г
$\frac{t_2}{2} = (29,4 \pm 0,1) \text{ с}$	Направляющая сила $D=0,00494 \text{ дин}\cdot\text{см}$

ческих измерений (куда входят общая водяная емкость, повышение температуры калориметра и близкое к единице отношение площади диафрагмы к площади круга крылышка) возможно было сделать с вероятной точностью $\pm 7\%$; неточности в определении истинной величины коэффициентов отражения, вероятно, не превосходят $\pm 10\%$.

Указанным неточностям отдельных измерений суперпонируются случайные неточности установки середины действительного изображения диафрагмы на крылышко и возможность, что излучение нагреваемого светом крылышка отражалось от вогнутой поверхности баллона и падало на другие части подвешенного прибора, причем место этого побочного нагревания изменялось в течение одного колебания прибора. Общая случайная ошибка, возможная при описанных измерениях с *белым светом*, вероятно, не превышает $\pm 20\%$.

При опытах с красным и синим светом, при которых количество падающей энергии в пять раз меньше, случайные колебания, обусловленные конвекцией, те же и потому точность полученных результатов соответственно меньше; то же самое надо заметить и относительно очень малых отклонений (едва достигающих четырех делений скалы) при слюдяном крылышке. Эти опыты, которые были предприняты в виде проверочных, все же позволяют утверждать, что в этих случаях не появляется новых пондеромоторных сил, которые по величине были бы сравнимы с максвелло-бартолиевыми силами.

Кроме того, я многократно производил сравнительные измерения над тонкими и толстыми металлическими (зеркальными) платиновыми и алюминиевыми крылышками; мне, однако, не удалось обнаружить достаточно ясно выраженной радиометрической разницы; вот почему в пределах погрешностей наблюдений можно считать радиометрические силы тонких металлических крылышек равными нулю.

Полученные результаты можно формулировать таким образом:

1) Падающий пучок света производит давление как на поглощающие, так и на отражающие поверхности; эти пондеромоторные силы не связаны с уже известными вторичными конвекционными и радиометрическими силами, вызываемыми нагреванием.

2) Силы давления света прямо пропорциональны энергии падающего луча и не зависят от цвета.

3) Наблюденные силы давления света в пределах погрешностей наблюдений количественно равны максвелло-бартолиевым силам давления лучистой энергии.

Таким образом, существование максвелло-бартолиевых сил давления опытным путем установлено для лучей света.

Комментарий

Статья П. Н. Лебедева «Опытное исследование светового давления» публикуется по изданию: Лебедев П. Н. Собрание сочинений. М., 1963.

Литература

- [1] Лебедев П. Н. Собрание сочинений. М., 1963.
- [2] Капцов Н. А. Петр Николаевич Лебедев. 1866—1912. М., 1950.
- [3] Фабрикант В. Работы П. Н. Лебедева по световому давлению // Успехи физических наук. 1950. Т. 42. Вып. 2. С. 282.

Голин Г. М., Филонович С. Р.

Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. — М.: Высш. шк., 1989. — 576 с.: ил. ISBN 5-06-000058-3