

Опытное исследование светового давления

П.Н. Лебедев
(Получено 1901)

— — ◊ ◊ ◊ — —

П.Н. Лебедев, Избранные сочинения, ред. А.К. Темерязев, (1949) 151.

— — ◊ ◊ ◊ — —

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 Максвелл¹ говорит:

<В среде, в которой распространяется волна, появляется в направлении её распространения давящая сила, которая во всякой точке численно равна количеству находящейся там энергии, отнесенной к единице объема>.

Дальнейшее обоснование этих максвелловых сил давления электромагнитных волн мы находим у Хевисайда,² Лорентца,³ Кона,⁴ и Д.А. Гольдгаммера⁵

¹J. C. M a x w e l l, Treatise on electricity and magnetism, § 792.

²O. H e a v i s i d e, Electromagnetic Theory 1, 334 (London, 1893).

³H. A. L o r e n t z, Versuch einer Theorie der electromagnetischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern, стр. 29 (Leiden, 1895).

⁴E. C o h n, Das electromagnetische Feld, стр. 543 (Leipzig, 1900).

⁵D. H o l d h a m m e r, Ann. d. Phys. 4, 834 (1901).

Бартоли (1876)⁶ 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 перевести лучистую энергию от более холодного тела к более тепловому, 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.

По пути, указанному Бартоли, последовал Больцман,¹ за ним кн. Б.Б. Голицын² и Guillaume³ при вычислениях давления лучей, а Друде⁴ распространил этот метод на абсолютно чёрное тело.

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

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

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 в 1², должны производить давление, которое в случае чёрной поверхности равняется 0,4 миллиграмма, а в случае зеркала — 0,8 миллиграмма.

Предположения, что лучи света должны производить давление, были высказаны уже гораздо раньше. Так, Кеплер (1619), стараясь объяснить характерную форму кометных хвостов, впервые высказал мысль, что эта форма обусловлена давлением солнечных лучей на частицы вещества хвостов; это предположение находилось в полном согласии с господствовавшей в то время гипотезой истечения и нашло горячую под-

⁶ A. B a r t o l i, Exner's Rep. d. Physik **21**, 198 (1884), немецкий перевод из Nuovo Cimento **15**, 195 (1883).

¹L. B o l t z m a n n. Wied. Ann. **22**, стр. 33, 291, 616 (1884).

²B. G a l i t z i n e, Wied. Ann, **47**, 479 (1892).

³Ch. Ed. G u i l l a u m e, Archives des Sciences phys. et nat. de Genève **31**, 121 (1894).

⁴P. D r u d e, Lehrbuch der Optik, стр. 447 (Leipzig, 1900).

держку со стороны Лонгомонтануса (1622).⁵ То же явление побудило Эйлера (1746)⁶ приписать световому лучу давящие силы, и он сделал попытку теоретически обосновать их, рассматривая световую волну (по Гюйгенсу) как продольное колебание.

Де-Мейран (1754)⁷ предпринял совместно с Дю-Фейем первые весьма интересные опыты, чтобы убедиться в справедливости указанных выше предположений, но он должен был оставить их, так как конвекционные токи в окружающем воздухе препятствовали наблюдению предполагаемого явления; если принять во внимание те средства, которыми мог располагать экспериментатор в XVIII веке, то опыты Де-Мейрана заслуживают самого большого удивления. Аналогичные опыты были предприняты потом Френелем, (1825)⁸ которого остановили те же затруднения; подробное изучение явлений, имеющих здесь место, повело Крукса⁹ к открытию радиометрических сил.

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.

Попытки, которые сделали в этом направлении Целльнер¹ и Бартоли (цит. выше, стр. 205), не привели к положительным результатам; вот почему я и предпринял нижеследующее опытное исследование светового давления.²

⁵ См. ниже у de M a i r a n , стр. 355-356.

⁶ L. E u l e r , Histoire de l'Academie de Berlin **2**, 121 (1746).

⁷ De M a i r a n , Traité physique et historique de l'Aurore Boréale (Seconde Edition), стр. 371 (Paris, 1754).

⁸ A. F r e s n e l , Ann. de Chimie et de Phys. (2) **29**, 57, 107 (1825).

⁹ W. C r o o k s , Philos. Transact. of the R. S. of London **164**, 501 (1874); в этой работе находится сводка относящейся сюда литературы.

¹ F. Z ö l l n e r , Pogg. Ann. **160**, 154 (1877).

² Предварительное сообщение об этом исследовании было сделано мною на Первом интернациональном конгрессе физики в Париже (в августе 1900); перевод сообщения помещен в Ж.Р.Ф.Х.О. (ч. физ.) **32** (1), стр. 211, 1900.

I. Предварительные опыты

В своем учебнике Максвелл (§ 793) говорит:

<Сконцентрированный электрический свет будет производить, вероятно, еще большее давление (чем солнечный свет), и нет ничего невозможного в том, что лучи такого света, падая на тонкую металлическую пластинку, легко подвешенную в пустоте, будут оказывать на эту пластинку заметное механическое действие>.

Когда я приступал к своим опытам, я полагал, что расположение, указанное Максвеллом, не приводит к цели, так как на этом пути уже потерпел неудачу Целльнер;³ он же <обратил внимание на то обстоятельство, что теоретически предсказанная Максвеллом числовая величина (светового давления) приблизительно в 100 000 раз менее той, которую наблюдал в одном частном случае] Крукс.>⁴ Если и можно было надеяться уменьшить в очень значительной мере эти побочные радиометрические силы, то все же, казалось мне, решающее значение может иметь только такой опыт, в котором удастся каким-либо образом компенсировать действие этих сил.

При исследовании радиометрических сил Шустер⁵ показал, что это суть внутренние силы радиометра; Риги⁶ подтвердил этот результат очень изящным опытом: <Я устроил так, — говорит Риги, — что радиометр плавал на поверхности воды вверх ногами; стеклянная шапка мельницы лежала при этом на той трубке, которая обыкновенно удерживает вращающийся стержень мельницы в вертикальном положении. Благодаря этому возникали силы трения, не допускавшие вращения мельницы. Когда я теперь направил на крылышко мельницы сильный пучок света, я не мог обнаружить ни малейшего вращения (радиометра)>.

К тому же выводу пришли и Бертэн и Гарб,¹ повторявшие этот опыт.

Желая обнаружить на опыте максвелло-бартолиевы силы светового давления, я воспользовался расположением Риги в таком виде: между двумя кружками, вырезанными из тонкого листового никеля, была зажата согнутая в виде цилиндра слюдяная пластинка. Цилиндр служил те-

³F. Z ö l l n e r, цит. выше, стр. 155.

⁴В основу своего подсчета Целльнер положил слишком малую величину для энергии излучения свечи. Если сопоставить радиометрические силы, которые наблюдал E. Nichols (Wied. Ann. **60**, 405 (1897)), с теми силами давления, которые вычисляются по Максвеллу и Бартоли из данных Ангстрёма (Wied. Ann. **67**, 647 (1899)) относительно излучения свечи, то отношение получается около 10 000.

⁵A. S c h u s t e r, Phil. Mag. (5) **2**, 313 (1876).

⁶A. R i g h i, дословный перевод приведен у Bertin et Garbe, см. ниже.

¹B e r t i n e t G a r b e, Ann. de Chim. et de Phys. (5) **11**, 67 (1877).

лом радиометра; внутри его находилось неподвижно скрепленное с ним крылышко. Этот радиометр был подвешен на стеклянной нити внутри эвакуированного стеклянного баллона. Когда я направлял на крылышко свет дуговой лампы, я постоянно наблюдал² отклонения, которые были одного порядка с теми, которые вычисляются по Максвеллу-Бартоли.³

Когда при этих предварительных опытах я стал изучать для сравнения силы, действующие на самое крылышко, без слюдяной оболочки, я нашел, что наблюдаемые при этом радиометрические силы далеко не достигают величины, которую указывает Целльнер. Вызываемое ими возмущение оказывается даже меньше того возмущения, которое обусловливается конвекцией. Последняя проявляется в очень сильной степени при сравнительно крупных размерах наружного сосуда радиометра. Поэтому я оставил этот метод и перешёл к другим опытам, которые я произвёл по простому методу, указанному Максвеллом.

II. Расположение опытов и приборы

Как ни просто максвелловское расположение опыта, оно встречает, 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 и 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 хотя 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

²Если Риги, а также Бертэн и Гарб не заметили *никаких* сил Максвелла-Бартоли, то это зависело *исключительно* от того, что их расположение, рассчитанное на гораздо большие радиометрические силы, было недостаточно чувствительно для измерения сил светового давления.

³Результаты этих предварительных опытов были доложены 17 мая 1899 года в заседании Société Vaudoise в Лозанне (Arch. des Sc. phys. et nat. Genève 8, 184 (1899)). Случайные обстоятельства помешали своевременному появлению предполагавшейся обстоятельной заметки, и она осталась ненапечатанной.

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 баллон¹ ($D = 20$), при помощи соответствующего светофильтра были исключены все лучи, которые могли бы быть поглощаемы стенками баллона,² крылышки были сделаны из тонкого металла, для того чтобы разница температур обеих поверхностей была по возможности мала, и разрежение³ было ведено (при помощи ртутного насоса и последующего его 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 освещённой и неосвещённой поверхностей крылышка, причем для двух равновеликих крылышек из одинакового материала и имеющих одинаковые свойства поверхностей эти силы прямо пропорциональны *толщинам*⁴ 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 приведённых выше, по своей природе известных побочных сил, можно указать еще и на возможную гипотезу, что открытое Ленардом и Вольфом⁵ распыление освещенных тел может сопровождаться заметными реакционными силами, которые являются неизбежными

¹См. W. C r o o k s, Philos. Transact. of the R. S. of London **170**. 113 (1879).

²См. W. C r o o k s, Philos. Transact. of the R.S. of London **168**, 266 (1878).

³См. W. C r o o k s, цит. выше, стр. 300.

⁴В моих опытах разница температур между освещённым 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 разнице температур.

⁵Ph. L e n a r d und M. W o l f, Wied. Ann. **37**, 455 (1889).

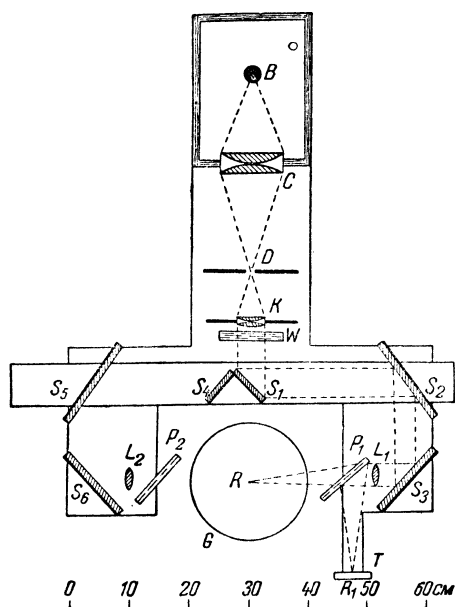


Рис. 1:

спутниками максвелло-бартолиевых сил давления света; эти гипотетические добавочные силы должны, однако, зависеть как от длины волны 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. 1, план):

Изображение кратера $B(+)$ угля дуговой лампы (30 ампер) собиралось при помощи конденсатора на металлическую диафрагму $D(d = 4)$. Выходящий из диафрагмы расходящийся пучок лучей падал на линзу и шел дальше параллельным пучком; для того чтобы освободить этот пучок от ультракрасных лучей, за линзой находился стеклянный сосуд с плоскопараллельными стенками W , наполненный чистой водой¹ (толщина слоя 1); для того чтобы изменять окраску лучей, в этом месте можно было помещать добавочное красное (<фотографическое>) стекло или заменять чистую воду голубым аммиачным раствором медной соли².

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

² При красном, а также при голубом светофильтре количество проходящей свето-

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 ($d' = 10$) 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, помещённое в стеклянном баллоне. Линзы L_1 и L_2 имели каждая фокусное расстояние в 20 при отверстии в 5; таким образом конический пучок света имел угол схождения в 15° . Всё приспособление с зеркалами было накрепко соединено с фонарём 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 в яркости света, которые неизбежно связаны с вольтовой дугой, возможно было только путём увеличения числа наблюдений.

Для того чтобы приводить отдельные ряды наблюдений к некоторой средней яркости света, служило следующее приспособление: между линзой L_1 (рис. 1) и стеклянным баллоном была поставлена тонкая плоская пластинка 1 под углом в 45° к направлению падающих лучей. Большая часть света свободно проходит через пластинку; отражённая часть света, собираясь, даёт действительное изображение R_1 диафрагмы, которое падает на термобатарей.

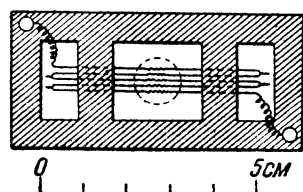


Рис. 2:

Термобатарея (рис. 2) состояла из пяти элементов — <константан-железо> (толщина проволок = 0,025), которые были укреплены в эбонитовой рамке и закрыты стеклянными пластинками; относительная яркость падающего света измерялась отклонениями гальванометра д'Арсонваля. Для того чтобы в одинаковой степени ослабить и пучок лучей, проходящий через линзу L_2 , здесь была вставлена такая же стеклянная пластинка 2 . Яркость света контролировалась только в том случае, когда двойное зеркало S_1S_4 (рис. 1) находилось в указанном положении; при сдвигении двойного зеркала свет не

вой энергии сокращается до одной пятой белого света; это служит доказательством того, что лучи, с которыми приходилось экспериментировать, почти исключительно принадлежали видимой части спектра.

мог падать на термобатарей, и это положение служило для определения нулевой точки гальванометра.

Для опытов служили три различных прибора (рис. 3) с разными крылышками.

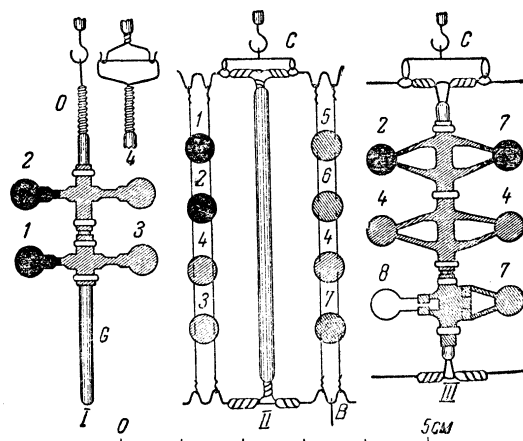


Рис. 3:

I прибор (рис. 3, *I*) 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) всех приборов сделать равновеликими, их пришлось вырезать стальным штанцем. Два крылышка прибора *I* имели с обеих сторон зеркальные поверхности, два других были с обеих сторон гальванически покрыты платиновой чернью¹, причем более толстое крылышко подвергалось в пять раз более продолжительному платинированию. Для того чтобы подвешивать прибор к крючку крутильной нити, к стеклянному стержню *G* была припаяна платиновая петля. Петля эта лежала в плоскости, перпендикулярной к плоскости крылышек, чтобы при подвешивании стержень *G* устанавливался в плоскости крылышек совершенно свободно.

II прибор (рис. 3, *II*) также состоял из стеклянного стержня, к концам которого были припаяны поперечные платиновые проволоки. Меж-

¹См. F. K u r l b a u m, Wied. Ann. **67**, 848 (1899). Полезно при начале платинирования в течение 30 секунд 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.

ду этими держалами были натянуты тонкие (0,05) 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 кардановским подвесом из платиновой проволоки, при помощи которого он и подвешивался к крючку крутильной нити; добавочный платиновый грузик удерживал стеклянный стержень в вертикальном положении.

III прибор был так же построен, как *I* прибор, с той разницей, что он был снабжён кардановским подвесом. Узкие металлические полоски (ширина 0,3), 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:

№ М а т е р и а л.

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

В качестве крутильной нити служила *стеклянная нить* (длина 30), которая на нижнем конце несла плоское зеркало и крючок для подвешивания приборов, а сверху была зажата в железном зажиме (рис. 4) внутри ртутного шлифа;² чтобы

²Все стеклянные шлифы, исполненные безукоризненно, были доставлены фирмой С. Крагер в Фрейбурге (Баден).

прикрепить нить *без помощи замазки*, её концы были зажаты между кусочками прокаленного асбестового картона, и эти последние внизу прижаты платиновым кольцом к державе зеркала, а сверху 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 скалы по Велльман-Мартенсу¹ оказалось замечательно удобным.

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

Наблюдения были произведены с тремя 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 секунд.

Разрезание производилось автоматическим насосом Кальбаума; ² измерения давления промером Мак-Леода-Кальбаума² показали, что легко достигаются разрежения, при которых парциальное давление воздуха меньше 0,0001 , (т. е. меньше одной пятнадцатой части давления насы-

¹F. M a r t e n s , Wied. Ann. **62**, 206 (1897); **64**, 625 (1898). Прибор получен от Schmidt und Haensch, Berlin, цена около 70 марок. Подобную скалу я очень рекомендую при работах с чувствительными гальванометрами и малыми зеркалами.

²G. K a h l b a u m , Wied. Ann. **53**, 109 (1894). Для избежания паров смазки от крана, который служит для предварительной откачки, между этим краном и насосом был устроен барометрический запор. Очень существенным добавлением, в видах прочности насоса, служила железная вставка в канал для падающей ртути. Прибор был получен от C. Kramer в Freiburg in Br. (Германия). Цена около 350 марок. Основываясь на многолетнем опыте работы с автоматическими ртутными насосами разных типов, я должен признать насос Кальбаума наиболее совершенным прибором из всех мне известных как по простоте ухода за ним, так и по высоте достигаемого разрежения.

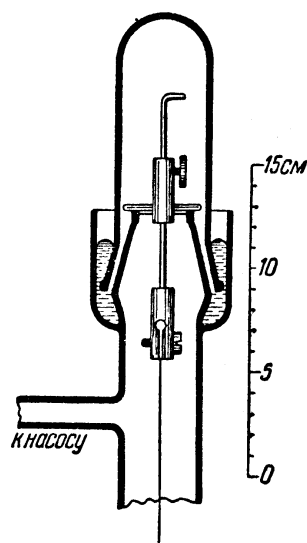


Рис. 4:

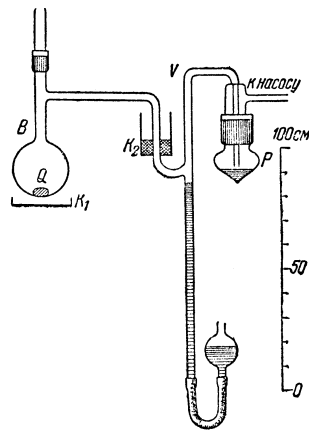


Рис. 5:

ценных паров ртути при комнатной температуре).

Для того чтобы получить ещё большее разрешение, служил следующий приём (рис. 5): капля ртути Q была помещена на дно стеклянного баллона, затем воздух разрежался насосом, и ртутная капля нагревалась в водяной бане 1 на 5° С выше комнатной температуры; испаряясь, ртуть перегоняется в насос и увлекает с собой остатки воздуха из баллона. Если отделить баллон от насоса и осушителя при помощи барометрического запора V , то в баллоне останутся только ртутные пары: их давление уменьшится до весьма малой величины, если наполнить сосуды 1 и 2 охлаждающей смесью из льда и соли.

Энергия падающих на крылышко лучей измерялась калориметрически: фонарь с зеркалами (рис. 1) отодвигался на салазках от баллона настолько, что крылышко прибора могло быть замещено равной ему по величине ($d = 5$) диафрагмой D (рис. 6 и рис. 8); 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.

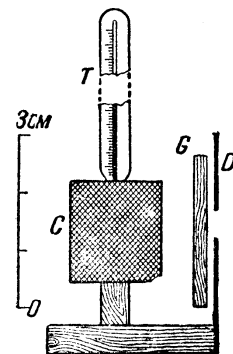
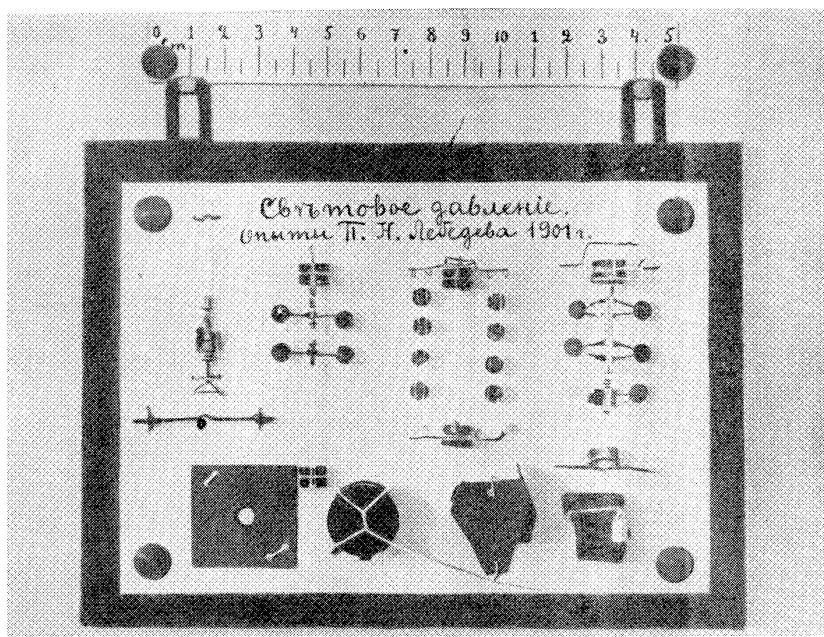


Рис. 6:



Приборы П.Н. Лебедева, служившие для опытов по световому давлению на твердые тела.

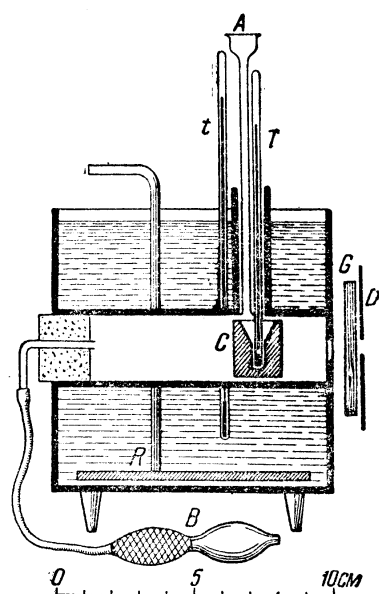


Рис. 7:

I калориметр (рис. 6) состоял из куска меди, в котором был просверлен вертикальный канал, наполненный ртутью; в ртути помещался шарик очень маленького калориметрического термометра, деленного на пятые доли градуса; поглощающая поверхность калориметра была закопчена. Вычисленная общая калориметрическая ёмкость прибора (полагая удельную теплоёмкость меди = 0,093) равнялась 3,13 воды.

II калориметр (рис. 8) представлял собой медный цилиндр, как и в первом калориметре, с общей тепловой ёмкостью, равной 3,61 воды; его поглощающая поверхность была предварительно вызолочена, а потом гальванически покрыта платиновой чернью; этот цилиндр находился в медной трубке, помещенной внутри водяной бани, около одного литра в объёме; баня была снабжена мешалкой *R*. Для того чтобы охладить калориметр ниже температуры бани, до начала опыта вводились по стеклянной трубке несколько капель этилового эфира в коническое углубление калориметра, и затем, при помощи резинового меха, прогонялся воздух, который и уносил с собой пары испаряющегося эфира.

Измерения показали, что на диафрагму ($d = 5$) падает в минуту от 1,2 до 1,8 ·, т. е. что яркость освещения при моих опытах была от двух до трех раз больше энергии солнечных лучей у поверхности земли. Для определения коэффициента отражения исследованных металлов служил

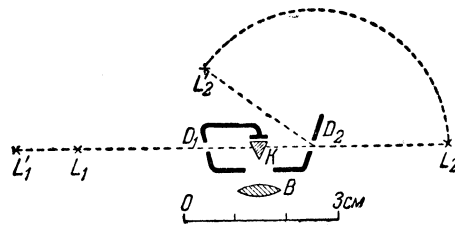


Рис. 8:

фотометр по Ritchie (рис. 9). Свет

двух маленьких лампочек накаливания L_1 и L_2 падал, проходя диафрагмы D_1 и D_2 (диаметр = 3), на маленькую призму из мела, причем ребро этой последней наблюдалось лупой. Передвигая лампу L_1 , можно было устанавливать на одинаковую яркость. Передвигая затем лампу L_2 приблизительно на 130° в L'_2 и придвигая снаружи вплотную к диафрагме D_2 исследуемую металлическую пластинку, можно было снова передвижением лампы L_1 в L'_1 установить на одинаковую яркость. Для угла падения в 25° коэффициент отражения $\rho = (L_1K : L'_1K)^2$.

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.

Перед началом опытов были предварительно изучены основные свойства всего оптического расположения: передвигая добавочный термоэлемент, соединенный с гальванометром д'Арсонваля, вдоль оптической оси линз L_1 и L_2 (рис. 1), можно было определить их фокусное расстояние для наиболее ярких лучей пучка. Затем зеркала и линзы прибора были выверены таким образом, чтобы действительные изображения диафрагмы при ходе лучей как справа, так и слева вполне совпадали.

Для того чтобы сравнить яркости пучков, идущих справа и слева, добавочный термоэлемент был помещён на месте образования действительных изображений диафрагмы и переменнo освещался то справа, то слева; из большого числа измерений обыкновенно следовало, что суще-

ствуется некоторая малая разница (около 1%) между яркостями обоих пучков; при большом числе отражающих стеклянных поверхностей такая разница уже вызывается несимметричным сметанием пыли.

При передвижении добавочного термоэлемента на $\pm 0,5$ из его главного положения в направлении оси пучка, в пределах, в которых могут колебаться установки пучка на крылышко, наблюдается уменьшение яркости для обоих направлений освещения на 5%.

Эти предварительные испытания совершенно необходимы.

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

После того как прибор с крылышками бывал помещён 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,¹ затем в течение от одного до двух часов снова производилось откачивание, после чего барометрический затвор V поднимался, и следовало охлаждение строганным 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.

¹ При указанной малой разнице температур ртуть не осаждается на более холодные стенки прибора, это явление, имеющее место при несмачиваемых поверхностях, было указано M. S a n t o r' o m, Wied. Ann. **56**, 493 (1895).

Другая причина, вызывающая колебание отсчетов, — это непостоянство вольтовой дуги, которое сказывается и при самых лучших углях.¹ 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,² наблюдавший за правильным горением дуги, по команде перемещал двойное зеркало S_1S_4 (рис. 1). Замыкая освещение с периодическими прерываниями, можно довести амплитуду колебаний прибора до нужной величины.

Таблица I даёт начало одного из протоколов наблюдений.

Таблица I.

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

L_1			L_2			L_1			L_2		
выч.			выч.			выч.			выч.		
		306	115					307	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				
	<u>314</u>						<u>316</u>				
	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.			

¹Вполне удовлетворительными оказались угли <A> Сименса; при более дешёвых углях наблюдения едва ли возможны.

²Моим помощником при этих опытах был помощник препаратора при кабинете Автоном Фёдоров; его добросовестное отношение и ловкое обращение с приборами в значительной мере облегчили мне эти нелёгкие наблюдения.

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>, даёт вычисленное (из трёх 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 гальванометра.

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

Указанным в таблице I способом производилось по семи рядовых отсчётов для L_1 и L_2 и из <Отклонений приведённых ($G = 100$)> выводилось среднее с обозначением средних \pm отступлений отдельных наблюдений. (Для крылышка таблицы I это двойное отклонение = $29,4 \pm 1,6$ дел. скалы.)

Для того чтобы сравнивать наблюдения, сделанные с различными крылышками, необходимы ещё следующие поправки.

В приборе I и III узкая полоска света падает, помимо самого кружка, и на части, его поддерживающие, благодаря чему отклонение увеличивается; измеряя площади освещённых частей и их расстояние от оси вращения, мы можем вычесть то добавочное действие, которое они производят (от 5% до 10% всей величины), и получаем то отклонение, которое обусловлено одним кружком крылышка (II прибор свободен от этой поправки). Для крылышка таблицы I эта поправка составляет 1,9 деления скалы; вычисленное двойное отклонение составляет 27,5 деления скалы.

Измерение расстояний центра кружка крылышка от оси вращения производилось следующим способом: дуговой фонарь с зеркальным прибором отодвигался на салазках в сторону, и со стороны падающих во время опыта лучей вешался возможно близко к баллону отвес из тонкой блестящей серебряной проволоки; зрительная труба с окулярным микрометром располагалась перпендикулярно к плоскости дисков на расстоянии около 4 метров, и надо было перемещать отвес до тех пор, покуда он не покрывал собой крутильную нить. Величина, соответствующая одному делению окулярного микрометра трубы, определялась при помощи визирования масштаба, расположенного поблизости баллона; кажущееся расстояние центра кружка крылышка от отвеса давало истинное расстояние первого от оси вращения и могло быть измерено с точностью до

$\pm 0,5$; измеряемые расстояния лежали между 9 и 11 .

На основании этих измерений наблюденные двойные отклонения были приведены к отклонениям, соответствующим расстоянию центров кружков от оси вращения, равному 1 . Для крылышка таблицы I такое приведенное отклонение равно 29,9 деления скалы.

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.¹

Таблица II.

Время простого качания		
Одно зеркало	$t_1 = 5,1 \pm 0,05$.	Медный цилиндр
Зеркало + медный цилиндр	$t_2 = 29,4 \pm 0,1$.	Длина = 4,0
Направляющая сила	$D = 0,00494$. .	Масса = 0,314

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

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

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 наблюденной. Для этого необходимо сделать калориметрическое измерение падающей световой энергии, а также фотометрическое измерение коэффициентов отражения крылышек.

Измерения с помощью первого калориметра (рис. 6) производились следующим образом: зеркала (рис. 1) отводились по салазкам в сторону настолько, что на место приборов с крылышками можно было поставить диафрагму калориметра D . Затем калориметр освещался в течение 5 минут, и через каждую минуту наблюдались показания термометра (а

¹Ср. F. K o h l r a u s c h, Lehrbuch der praktischen Physik, § 29 и прим. 11 и 12. Teubner, Leipzig 1901.

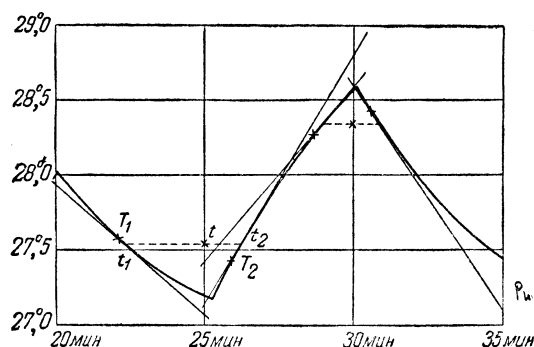


Рис. 9:

также и гальванометра). После этого посредством непрозрачного экрана освещение прерывалось, и в следующие 5 минут снова через каждую минуту наблюдались показания термометра, которые теперь постепенно уменьшались, и нулевая точка гальванометра. Полный ряд наблюдений заключал в себе пять последовательных периодов освещения.

Все наблюдения обрабатывались графически, для чего показания термометра наносились на координатную бумагу и соединялись непрерывной кривой так, чтобы последняя протекала возможно гладко (рис. 10). Из рисунка ясно, что ход температуры уже через 10 секунд обнаруживает особой точкой поворота переход от освещения к затемнению или обратно.

Очень большая скорость охлаждения калориметра влечет за собой необходимость особой обработки результатов, так как даже в течение одного интервала наблюдения ни скорость нагревания, ни скорость охлаждения не представляют из себя постоянной величины. Для определённой средней температуры *поверхности* калориметра обе скорости имеют постоянные значения, представляемые касательными (последние легко наносятся на чертеже). Для этих постоянных величин точки пересечения касательных с ограничивающими интервал ординатами дают те разности температур, которые установились бы в 5 минут, если бы обе скорости были постоянны; сумма двух разностей дает общее, поправленное на потери, повышение температуры калориметра.

Но здесь выступает один источник ошибок при определении истинной средней температуры поверхности; термометр не успевает следовать за температурой и дает при освещении слишком низкие, а при охлаждении слишком высокие показания. То обстоятельство, что термометр обнаруживает точку поворота через 10 сек., позволяет, в виде первого и для

наших опытов достаточного приближения, допустить, что термометр отстаёт на 20 сек. Тогда для средней температуры нужно сравнивать не точки кривой t_1 и t_2 , но точки 1 и 2, лежащие на той же кривой на 20 сек. раньше.

Такие графические определения были проделаны при каждом нагревании для двух температур; таблица III представляет один ряд измерений.

Таблица III.

Калориметр I. Водяной эквивалент = 3,13 .

Скорость нагревания	Скорость охлаждения	Общее нагревание	Отклонение гальванометра	Приведённое общее нагревание ($G = 100$)
I { 1°, 57 1, 49	0°, 63 0, 80	2°, 30 2, 29	140 . 128 >	1°, 64 1, 79
II { 1, 44 1, 31	0, 85 1, 10	2, 29 2, 40	128 > 122 >	1, 79 1, 97
III { 1, 38 1, 00	1, 08 1, 37	2, 46 2, 37	129 > 126 >	1, 91 1, 88
IV { 1, 30 1, 04	1, 15 1, 45	2, 45 2, 49	123 > 127 >	1, 99 1, 96
V { 1, 26 0, 93	1, 27 1, 50	2, 54 2, 43	129 > 126 >	1, 97 1, 93

Общее нагревание в 5 мин. ($G = 100$) $1°, 88 \pm 0°, 09$.

Со вторым калориметром (рис. 8) измерения были гораздо проще: калориметр охлаждался (на $2,5°$ ниже температуры бани) при помощи этилового эфира, затем подвергался нагреванию лучами, и наблюдатель через каждую минуту отсчитывал показание калориметрического термометра (а в промежутки — отклонение гальванометра и температуру водяной бани). Наблюдения наносились графически, соединялись сплошной кривой, на этой кривой отмечалась температура бани,¹ и в этой точке проводилась касательная к кривой, соответствующая *истинной* скорости нагревания калориметра, независимо от потерь через лучеиспускание; если взять две точки кривой, соответствующие времени в 2,5 мин. до и после наступления равенства температур, то мы также получим среднюю скорость нагревания калориметра в течение 5 мин. Та-

¹Надо опять иметь при этом в виду, что калориметрический термометр отстаёт от истинной температуры калориметра на 20 сек.

блица IV дает результаты наблюдений.²

Таблица IV.

Калориметр II. Общая калориметрическая емкость = 3,61 воды.

Ряды наблюдений	Нагревание в течение 5 мин.		Среднее	Отклонение гальваном.	Нагревание, приведенное к $G = 100$ дел. скалы
	Из касательной	Из разниц температур			
I	2°,40	2°,41	2°,40	159 дел. скал.	1°,51
II	2°,55	2°,57	2°,57	163 » »	1°,57
III	2°,43	2°,50	2°,46	158 » »	1°,56

Среднее нагревание (для $G = 100$) $1^\circ,55 \pm ^\circ,02$,

Отсюда получаем количество падающей в течение секунды энергии:

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

При наших опытах лучи падали не параллельным, а сходящимся пучком; их наклон был, однако, так незначителен, что обусловленная им поправка³ (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 чёрного тела мы получаем на основании калориметрических измерений таблицы IV величину давления :

$$(\text{в динах}) = \frac{E \text{ (в эргах)}}{3 \cdot 10^{10}} = 0,0000258 \text{ дин.}$$

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

² Результаты таблиц III и IV не могут служить для непосредственного сравнения, так как они относятся к различным регулировкам термобатареи.

³ См. L. V o l t z m a n n, Wied. Ann. **22**, 292 (1884), а также Д.А. Г о л ь д г а м м е р, цит. выше, стр. 844.

В этих единицах результаты таблицы I выразятся таким образом:

$$p = \frac{0,0000308 \pm 0,0000017}{0,0000253} = (1,19 \pm 0,07) \text{ МБ.}$$

Непосредственное измерение коэффициентов отражения исследованных крылышек являлось невозможным, потому что их поверхности оказались слишком неровными. Поэтому я определил при помощи фотометра (рис. 9) коэффициенты отражения тех металлических листов, из которых были сделаны крылышки; у этих листов неровности также сказывались в значительной степени и, кроме того, ясно выраженная окраска отраженного света (особенно у никеля); величины этих коэффициентов отражения, измеренных для угла падения в 25° , приведены в таблице V без дальнейших приведений. Для сравнения тут же указаны коэффициенты отражения при нормальном падении лучей ($\lambda = 600 \mu\mu$) по Гагену и Рубенсу,¹ и на их основании вычислены максвелло-бартолиевы силы (числа, полученные для магналиума, приведены для алюминия).

Таблица V.

	Фотометр. измерения		По Гагену и Рубенсу	
	ρ	ρ	ρ	ρ
Платина	$0,5 \pm 0,05$	1,5 МБ	0,64	1,64 МБ
Алюминий ...	$0,6 \pm 0,05$	1,6 »	0,83	1,83 »
Никкель	$0,35 \pm 0,05$	1,4 »	0,65	1,65 »

Для *слюды* я не привожу вычислений, так как наблюдения были сделаны только с одним крылышком, и нет проверочных измерений с более толстыми крылышками.

Ниже изложены результаты отдельных рядов наблюдений, сделанных мной при помощи разных приборов. Когда я перешел от наблюдений при комнатной температуре, при которой неизбежные колебания окончательных результатов довольно значительны, к измерениям при охлаждении льдом с солью, я не ожидал получить такого согласия между наблюденными величинами и вычисленными по Максвеллу-Бартоли, которое вытекало из моих опытов; я поэтому предположил, что такое совпадение вычислений и наблюдений надо приписать случайности, и поэтому сперва заменил I калориметр II калориметром, а затем и II прибор с крылышками III прибором.

Многочисленные наблюдения, которые я делал с I прибором при комнатной температуре, значительно уступают последующим измерениям,

¹H. Hagen und Rubens, Ann. d. Phys. 1, 373 (1900).

а поэтому и не приведены мною. Не приведены также наблюдения с платинированным крылышком (2) *II* прибора, так как при последовавшем за опытами микроскопическом исследовании крылышка выяснилось, что платиновая чернь осела неудовлетворительно в виде губки (чего на других крылышках не наблюдалось). С *III* прибором были, к сожалению, сделаны только два ряда наблюдений, так как дальнейшие опыты были прерваны поломкой аппарата.

Таблица VI.

	I прибор	I калориметр					II калориметр					III прибор	
		Белый свет					Белый свет	Красный свет	Белый свет	Синий свет	Белый свет		
		1,6 ±0,1	1,5 ±0,1	—	—	—					1,5 ±0,1	1,4 ±0,1	
1. Толсто-платинированное крыльшко	1,8 ±0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2. Тонко-платинированное крыльшко	1,3 ±0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Вычислено	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3. Платина толстая	—	1,8 ±0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4. » тонкая	—	2,0 ±0,1	1,9 ±0,2	1,8 ±0,1	1,9 ±0,1	1,9 ±0,1	(1,8 ±0,1)	1,7 ±0,1	(1,5 ±0,5)	1,7 ±0,2	2,0 ±0,1	—	—
5. Алюминий толстый	—	—	2,3 ±0,4	1,9 ±0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6. » тонкий	—	—	2,0 ±0,1	2,3 ±0,1	2,0 ±0,2	2,0 ±0,2	(2,9 ±0,8)	2,1 ±0,1	(2,5 ±0,5)	1,4 ±0,2	1,7 ±0,1	—	—
7. Никель тонкий	—	—	1,7 ±0,3	1,2 ±0,2	1,4 ±0,1	1,4 ±0,1	(2,3 ±0,5)	1,4 ±0,2	(2,7 ±0,9)	—	—	—	—
8. Слюда	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,08 ±0,05	0,13 ±0,03	—

IV. Результаты

Результаты опытов приведены в единицах МБ; под каждой наблюденной величиной приведено в тех же единицах и среднее колебание в установках приборов, причём все колебания, меньшие чем 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 приведённых измерений, могут служить следующие соображения: колебания при установках прибора во время измерений приведены в таблице VI; 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 $\pm 8\%$; вычисление абсолютной величины МБ единицы из калориметрических измерений (куда входят общая водяная ёмкость, повышение температуры калориметра и близкое к единице отношение площади диафрагмы к площади круга крылышка) возможно было сделать с вероятной точностью в $\pm 7\%$; 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 четырёх 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 путём установлено для лучей света.

Физическая лаборатория Университета.

Москва, август 1901.