

Давление света, масса и энергия ¹⁾.

(Памяти П. Н. Лебедева.)

С. И. Вавилов.

В физике наших дней на-ряду с изумительно быстрым накоплением новых опытных фактов идет глубокий органический процесс изменения исходной точки зрения, пересмотр основных представлений и понятий. Старые, знакомые ньютоновские понятия массы, силы и ускорения начинают заменяться, пока еще робко и в виде попытки, непривычной „кривизной четырехмерного пространства“, „мировыми линиями“, „тензором энергии“. Современному физики порою кажется, что почва ускользает из-под ног и потеряна всякая опора. Головокружительное ощущение, испытываемое при этом, вероятно, схоже с тем, которое пришлось пережить астроному-староверу времен Коперника, пытавшемуся постигнуть неподвижность движущегося небесного свода и солнца. Но это неприятное ощущение — обманчиво, почва тверда под ногами физика, потому что эта почва — факты. В разбушевавшемся океане теорий и „точек зрения“ факты недвижимы и тверды, как прежде, и физик-экспериментатор может спокойно смотреть со своей твердыни на бушующие волны, расчетливо выбирая нужное для себя и руководящее.

П. Н. Лебедев был экспериментатором *par excellence*. Главный труд его жизни, обнаруженное и измеренное им давление света было для него прежде всего и важнее всего опытным фактом. Он знал, что „Максвелло-Бартолиевы силы давления лучей могут со временем получить большое значение в вопросах физики и астрономии“ ²⁾, но это значение опять всецело определялось новыми фактами, главным образом применением светового давления к физике неба.

Между тем в области теоретической физики, где почва зыбкая и каждый миг возможны „перевороты“ и изменения точки зрения, факт, открытый Лебедевым, — световое давление, получил огромное значение, в некоторых случаях совершенно эквивалентное значению первого и

¹⁾ Доклад, прочтенный на соединенном заседании памяти П. Н. Лебедева О-ва Любителей Естественных Наук, Антропологии и Этнографии и коллоквиума Московского Физического Института О-ва Научного Института 18 марта 1922 г.

²⁾ П. Н. Лебедев. Собрание сочинений, стр. 123, Москва, 1913 г.

второго начала термодинамики. Не следует забывать, что оба начала по существу суть опытные факты—невозможность осуществления в природе *mobili perpetui*. Таким же основным фактом-принципом послужило световое давление для термодинамики лучистой энергии. Необходимость существования давления света вытекает, правда, уже из второго начала, как это показал Бартоли (Bartoli), но величина его и зависимость от тех или иных величин отсюда еще неопределима. Для этого требуется конкретное представление о природе света. Различные воззрения приводят к различным результатам. В теории истечения световое давление должно быть вдвое большим, чем в волновой теории света. Измерения Лебедева являются решающими в этом отношении и дают новый аргумент в пользу волновой теории света. Чисто термодинамическим путем, привлекая световое давление в качестве добавочного принципа, Больцман (Boltzmann) выводит закон энергии интегрального черного излучения в зависимости от температуры, так называемый закон Стефана (Stefan'a)—Больцмана (Boltzmann'a).

Пользуясь световым давлением и принципом Допплера (Doppler), Вип (Wien) опять чисто термодинамически делает следующий шаг в смысле определения зависимости черного излучения от температуры и длины волны.

Термодинамика—наиболее незыблемая ветвь теоретической физики, являющаяся по существу логически-математическим развитием основных исходных фактов-принципов. С этой точки зрения давление света может также рассматриваться, как принцип термодинамики.

Но значение факта, открытого Лебедевым, не ограничивается областью термодинамики. Световое давление играет первостепенную роль в том ревизионистском движении современной физики, на которое я указал вначале. Я позволю себе остановиться несколько подробнее именно на этом применении светового давления в теоретической физике.

Только в настоящее время можно оценить всю осторожность Ньютона, определившего во втором законе движения силу через количество движения или импульс. Понятия массы и силы, с которыми мы привыкли оперировать, не являются первичными. Мы ощущаем не мгновенные силы и массы; первично данными для нас являются импульсы—давления, именно давление-импульс должен служить рациональным фундаментом механики. Второй закон Ньютона содержит в сущности две части: во-первых, определение силы:

$$J = f \cdot dt, \quad (1)$$

где J —импульс, f —сила; во-вторых, импульс определяется, как изменение количества движения:

$$J = \Delta (m \cdot v), \quad (2)$$

т.-е. вводится понятие массы, изменение произведения двух функций m и v равняется импульсу. В более „популярной“ форме второго закона

$$f = m \cdot a, \quad (3)$$

где a — ускорение. Такая форма менее рациональна, так как в обеих частях равенства фигурируют неизвестные „сила“ и „масса“, при чем исходят из приближенно установленного опытного факта постоянства массы.

Первостепенное значение в физике приобретает вторичное понятие энергии, которую при помощи импульса можно определить так:

$$dE = J \cdot v = v \cdot d(mc). \quad (4)$$

Не делая никаких гипотез относительно массы, мы в праве, раскрывая значение полного дифференциала $d(mc)$, перенести равенство (4) так:

$$dE = v^2 \cdot \frac{dm}{dv} \cdot dv + mv \cdot dv. \quad (5)$$

Предположим, что мы обнаруживаем в природе наличие некоторого давления-импульса, наблюдая, например, с помощью Лебедевского давящего прибора. Если мы измерим величину давления и скорость давящего агента, то, по определению Ньютона, мы найдем изменение количества движения. В опытах Лебедева с черною поглощающей поверхностью давление

$$P = \frac{E}{c}, \quad (6)$$

где E — энергия, падающая в 1 секунду, и c — скорость света. Световой поток, имея начальную скорость c , поглощаясь, останавливается, т.-е. конечная скорость равна нулю. Изменение количества движения будет, следовательно,

$$M \cdot c - M' \cdot 0 = Mc, \quad (7)$$

где M и M' — начальная и конечная масса светового потока, которую мы имеем право ему приписать по основному определению (2). Приравнявая (6) и (7), находим

$$\frac{E}{c} = Mc,$$

откуда можем определить „массу“ света:

$$M = \frac{E}{c^2}, \quad (8)$$

В эмиссионной теории света, как легко видеть, соответствующая масса

$$M = \frac{2E}{c^2},$$

но там эта масса вполне понятна и привычна, масса же (8), связанная с лучистой энергией, в которой мы привыкли видеть только энергию, кажется нам странной и неожиданной, к признанию ее вынуждает, как мы видели, световое давление. Мы привыкли в объектах природы предполагать наличие совершенно отдельных „массы“ и „энергии“, в световом потоке мы встречаемся со странным объектом, в котором приходится говорить о „массе энергии“. Световое давление вынуждает к пересмотру привычного понятия массы.

Можно сделать и следующий смелый, правда—несколько гипотетический шаг¹⁾. Мы знаем, что одна форма энергии превратима в другую, причем величина энергии остается неизменной. Мы имеем поэтому достаточное основание попробовать распространить соотношение (8) на всякую форму энергии, в частности на энергию движения. Воспользуемся дифференциальным соотношением (5), подставив вместо dE на основании (8)

$$dE = c^2 dm. \quad (9)$$

Тогда найдем

$$v^2 dm = v^2 dm + m v \cdot dv.$$

Разделяя переменные m и v , находим

$$\frac{dm}{m} = \frac{v \cdot dv}{c^2 - v^2}. \quad (10)$$

Уравнение (10) просто интегрируется. Положим, что при скорости, равной нулю, масса будет m_0 , при скорости v масса m , тогда находим

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_0 \left\{ 1 - \frac{v^2}{c^2} \right\}^{-\frac{1}{2}} = m_0 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} - \dots \right\} \quad (11)$$

Эту замечательную формулу можно вывести приближенно совершенно просто. В самом деле, представим себе, что некоторая неподвижная масса m_0 стала двигаться со скоростью v , приобретая таким образом кинетическую энергию:

$$E = \frac{m_0 v^2}{2},$$

¹⁾ P. Lenard. Jahrb. d. Radioaktivität u. Elektronik, 1921.

но масса, обладающая энергией E , по нашему исходному предположению, увеличивается на величину

$$M = \frac{E}{c^2} = \frac{m_0 v^2}{2 c^2}.$$

Таким образом общая движущаяся масса m будет

$$m = m_0 + \frac{1}{2} m_0 \frac{v^2}{c^2} = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (12)$$

Неточность, которую мы допустили, заключается в том, что массу во втором добавочном члене мы считали неподвижной m_0 . Однако для тех скоростей v , с которыми можно оперировать на опыте, формулы (11) и (12) дают практически один и тот же результат.

Как известно, формула (11) может быть выведена на основании электронной теории материи, а также теории относительности. Приведенный вывод является наиболее простым. Изучение изменения массы электронов, излучаемых радием с огромными скоростями, подтвердило справедливость найденного соотношения. Таким образом мы имеем полное право говорить о „массе энергии“ для энергии любой формы. Популярное понятие массы совершенно потеряло всякую отчетливость.

Массы по Ньютону тяготеют друг к другу. Распространяется ли это свойство и на „массу энергии“? Механически обе массы ничем не отличаются, но, может быть, существует различие в отношении тяготения. Опыт с радиоактивным маятником, произведенный Саутернсом (Southern¹⁾) показывает, что такого различия не существует, масса энергии одновременно — тяготеющая масса. Отсюда вполне естественен следующий шаг. Поток света обладает энергией и „массой энергии“; следовательно, в гравитационном поле некоторой массы луч света должен отклоняться от своего прямолинейного пути. Наблюдение полного солнечного затмения 29 мая 1919 г. подтвердило и этот вывод, свет неподвижных звезд, проходящий вблизи солнца, отклоняется. Нетрудно вычислить и величину этого отклонения, при чем наблюдаемая величина оказалась приблизительно вдвое больше вычисленной. К точному результату, как известно, приводит всеобщая теория относительности; однако для определенного суждения по этому вопросу необходимы еще новые наблюдения.

Итак, мы видим, что Лебедевское световое давление приводит к необходимости пересмотра понятия массы и к новым замечательным фактам. Так, вокруг основного, твердо установленного факта путем

¹ I. Southern's. Proceed. R. Soc. A. 84, p. 325 (1910).

временных построек теорий начинают появляться все новые факты, почва под ногами физика-экспериментатора крепнет, и он бодро может слушать треск и грохот рушащихся мировоззрений, фактов они не заденут. В наши дни, когда в связи с этим крушением теорий начинают говорить даже о „конце физики“, особенно поучительно вспомнить о физиках-экспериментаторах, закладывавших краеугольные камни в здании физики, к числу которых принадлежит и П. Н. Лебедев.