

Национальный исследовательский университет  
Высшая Школа Экономики

курс-майнор 2017-2018 уч.года  
«Квантовая физика 'для чайников'»

В.Н.Глазков

Лекция 2

Давление света.  
Эффект Комптона.

## Оглавление

Импульс фотона.....	4
Давление света.....	5
«Квантовое» описание давления света.....	5
Опыты Лебедева по обнаружению давления света.....	6
Давление света в космосе, астрофизике, и в лаборатории.....	8
Солнечный парус.....	8
Радиационное давление в звёздах и около звёзд.....	9
«Оптические пинцеты» для работы с микро- и нано- частицами.....	9
Эффект Комптона.....	10
Опыт А.Комптона и его описание.....	10
Разновидности и применения эффекта Комптона: обратный эффект Комптона, эффект Зельдовича-Сюняева, детектирование нейтрино.....	13
Обратный эффект Комптона.....	13
Эффект Сюняева-Зельдовича.....	13
Детектирование нейтрино.....	14

## Список литературы

- 1: Музей Оптики, Радиометр Крукса, 2017, <http://optimus.ifmo.ru/ru/exhibit/6/>
- 2: youtube.com, How a Crookes radiometer works, 2017, [https://www.youtube.com/watch?v=r7NEI\\_C9Yh0](https://www.youtube.com/watch?v=r7NEI_C9Yh0)
- 3: Peter Lebedew, Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes, Annalen der Physik, 311, 433 (1901)
- 4: Лазарев П. П., К двадцатипятилетию со дня смерти П. Н. Лебедева, УФН, 17, 405 (1937)
- 5: Т.П. Кравец , П. Н. Лебедев и световое давление, УФН, 46, 306 (1952)
- 6: wikipedia.org, IKAROS, 2017, <https://en.wikipedia.org/wiki/IKAROS>
- 7: Японское космическое агентство, Зонд IKAROS, , <http://www.jspec.jaxa.jp/e/activity/ikaros.html>
- 8: Arthur Ashkin, Optical Trapping and Manipulation of Small Particles by Laser Light Pressure, in "OSA Century of Optics", p.223 (2010)
- 9: A. Compton, A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements, Physical Review, 21, 483 (1923)
- 10: John E. Carlstrom, Gilbert P. Holder, and Erik D. Reese, Cosmology with the Sunyaev-Zel'dovich Effect, Annu. Rev. Astron. Astrophys., 40, 643 (2002)
- 11: Super Kamiokande, The World's Largest Underground Neutrino Detector, 2017, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

## Импульс фотона

Для объяснения фотоэффекта оказалось необходимым учитывать квантовую природу света — немного нарушив в нашем рассказе историческую последовательность, мы в законе сохранения энергии для фотоэффекта (уравнении Эйнштейна) использовали гипотезу Планка о дискретном характере излучения и поглощения электромагнитных волн. При описании фотоэффекта существенным было наличие у кванта света (фотона) вполне определённой энергии  $E = \hbar\omega = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ .

Из обычной механики мы помним, что у «нормальных» частиц есть не только энергия, но и импульс. Причём импульс является сохраняющейся величиной. Естественно, возникает вопрос — есть ли импульс у фотона?

Ответ на этот вопрос оказывается не квантовым, хотя его строгое доказательство и оказывается за рамками нашего курса. Оказывается, что при переносе энергии всегда переносится и импульс, то есть любая волна (световая, звуковая), которая переносит энергию переносит и импульс. В частности, теория электричества показывает, что при переносе плоской волной энергии  $E$  волна перенесёт импульс  $\frac{E}{c}$ .

При введении гипотезы Планка о дискретной передаче энергии в процессах излучения мы, таким образом, с необходимостью должны приписать фотону с энергией  $\hbar\omega$  импульс  $\frac{\hbar\omega}{c}$ , направленный в направлении распространения плоской волны.

Утверждение о переносе волной импульса может показаться немного непривычным, что во многом является данью запомненного в школе определения «волна переносит энергию, но не переносит массу», вступающего в конфликт со школьным же определением импульса  $\vec{p} = m\vec{V}$ . Но это кажущаяся проблема: это определение импульса для классической частицы просто не имеет отношения к волне электромагнитного поля.

В качестве качественного аргумента о существовании импульса волны можно заметить следующее. В однородном пространстве<sup>1</sup> излучённый волновой пакет (например, импульс радиоволн радиолокатора) будет продолжать движение в направлении излучения. То есть, у этого волнового пакета есть *сохраняющаяся векторная характеристика*. А в механике такой характеристикой, связанной с однородностью пространства, является именно импульс.

Наконец, заметим, что с переносом импульса волнами мы регулярно встречаемся в реальной жизни: так как по 2 закону Ньютона сила  $\vec{F} = m\vec{a} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ , то при излучении и поглощении волн (при передаче их энергии и импульса каким-то телам) возникнет давление на поглощающее или излучающее тело. Это, в частности, звуковое давление, благодаря которому мы слышим.

Суммируя ещё раз вышесказанное применительно к фотону, повторим: из известных свойств электромагнитных волн с необходимостью следует, что при переносе квантом плоской электромагнитной волны энергии  $\hbar\omega$  он с необходимостью должен переносить импульс

<sup>1</sup> Формулировка не строгая, мы в этом рассуждении также предполагаем отсутствие дисперсии, то есть совпадение фазовых скоростей всех волн, формирующих пакет.

$\frac{\hbar \omega}{c}$  в направлении распространения волны.

## Давление света

### «Квантовое» описание давления света

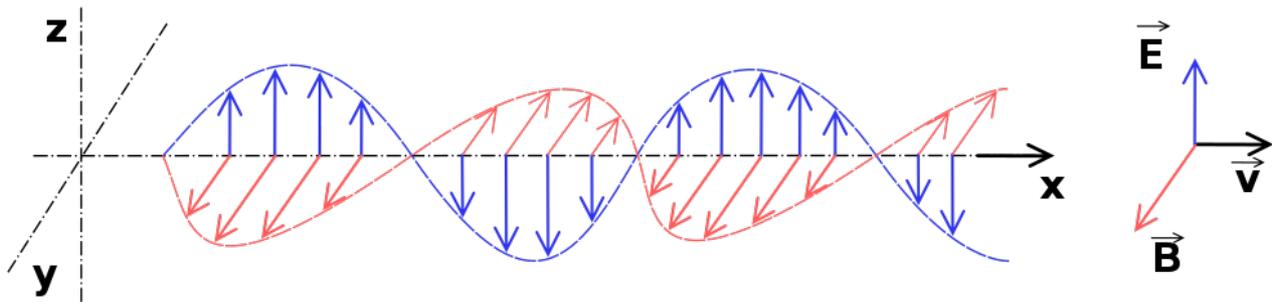


Рисунок 1 Поляризация электрического и магнитного поля в плоской электромагнитной волне. С сайта [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Onde\\_electromagnetique.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Onde_electromagnetique.png)

Проявлением наличия импульса у электромагнитной волны является давление света. Подчеркнём сразу, что это не квантовый эффект, в чем мы наглядно убедимся чуть позже, получив формулу для давления света.<sup>2</sup> Однако понятность корпускулярной аналогии, когда электромагнитная волна заменяется потоком «мячиков»-фотонов бомбардирующих мишень, позволяет легко получить ответ для давления света.

Рассмотрим задачу о давлении света в чуть более общем виде, чем просто отражение от зеркальной поверхности. Пусть поток электромагнитного излучения мощности  $W$  на частоте  $\nu$  падает нормально на пластину. Пусть пластина отражает долю падающего излучения  $\alpha_1$ , поглощает долю излучения  $\alpha_2$ , соответственно доля излучения  $(1-\alpha_1-\alpha_2)$  проходит через пластину. Эти рассуждения могут быть легко обобщены на случай наклонного падения.

В единицу времени на поверхность пластины падает  $n = \frac{W}{h\nu}$  фотонов, импульс каждого фотона  $p = \frac{h\nu}{c}$ . Отражающиеся фотоны ( $n_1 = \alpha_1 n$ ) передают пластине импульс  $2p$  каждый, поглощённые ( $n_2 = \alpha_2 n$ ) — импульс  $p$ . Давление на пластину ищется аналогично давлению газа:

<sup>2</sup> Качественное рассуждение в рамках теории электричества и классической механики учитывает, что электромагнитная волна поперечная и в ней одновременно колеблются электрическое и магнитное поле, причём взаимная ориентация векторов напряжённости магнитного поля  $\vec{E}$ , индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и направления распространения волны  $\vec{k}$  (рисунок 1). Если эта волна падает на тело, в котором есть свободные покоящиеся положительно заряженные частицы, то под действием электрического поля волны эти частицы начинают двигаться в направлении электрического поля. Но тогда на движущиеся частицы начинает действовать магнитное поле волны: возникает сила Лоренца, отклоняющая эту частицу в направлении распространения волны (мнемоническое правило левой руки). Т.е., частица приобретает импульс в направлении движения волны, который в дальнейшем будет передан всему телу. Легко показать, что для отрицательно заряженной частицы эффект не сменит знак.

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1}{S} \frac{d p}{d t} = \frac{1}{S} (\alpha_1 n \cdot 2 p + \alpha_2 n \cdot p) = \frac{2 \alpha_1 + \alpha_2}{S} \cdot \frac{W}{c} .$$

Видно, что в ответ постоянная Планка не вошла. Это означает, что полученный результат не является результатом квантовой физики и может быть получен из классических соображений. Кроме того, ответ не зависит от частоты излучения, поэтому предположение о монохроматичности излучения было излишне — важна только полная мощность падающего излучения.

То, что классический результат можно получить и с применением соображений квантовой физики подчёркивает одну из существенных особенностей развития научного знания. Новая «более правильная» теория (квантовая в нашем случае) позволяет повторить результаты предшествующей теории (классической физики) в её области применимости.

В качестве оценки величины давления света, найдём какое давление создаёт свет Солнца на зеркальную поверхность на орбите Земли. Интенсивность солнечного излучения на земной орбите равно примерно  $W/S \approx 1.4 \text{ кВт/м}^2$ . Подстановкой получим для зеркальной поверхности  $P = \frac{2 W/S}{c} = \frac{2 \times 1400}{3 \cdot 10^8} \text{ Па} = 9.3 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$ . Эта величина очень маленькая: при

приложении этого давления к площадке площадью 1 квадратный сантиметр ( $10^{-4} \text{ м}^2$ ) на площадку будет действовать сила  $F = P S$ , примерно равная  $10^{-9} \text{ Н}$ . Эта сила равна силе тяжести, действующей на объект массой  $10^{-10} \text{ кг} = 10^{-7} \text{ г} = 0.1 \text{ мкг}$ . Для сравнения, вес макового зёрнышка составляет около 0.5 мг — в тысячу раз больше! Поэтому для обнаружения давления света требовалось ставить очень чувствительные опыты.

## Опыты Лебедева по обнаружению давления света



Рисунок 2: Радиометр Крукса. С сайта [1].

Полученная нами формула подсказывает идею опыта по обнаружению давления света: если сделать сбалансированную крыльчатку, у которой одна сторона крылышек посеребрена, а другая зачернена, то из-за большего давления на зеркальную поверхность при освещении крыльчатки она должна начать вращение *зеркальной стороной от источника света*.

С похожим прибором (рисунок 2) вы могли встретиться на уроках физики в школе в качестве демонстрации (например, видео на youtube [2] и сайт музея оптики [1]). Однако, наблюдательный зритель может отметить, что в приборе на демонстрации крыльчатка крутится в противоположном направлении, *чёрной стороной от источника света*. То есть, причина вращения крыльчатки — не давление света. Вращение этого прибора (радиометра Крукса) связано с тем, что вакуум в нём недостаточно высокий. Возникновение

вращательного момента связано с тем, что при освещении чёрная сторона крыльчатки нагревается, разреженный газ вблизи чёрной стороны крыльчатки оказывается чуть горячее газа у зеркальной стороны крыльчатки, и давление более горячего газа на чёрную сторону крыльчатки оказывается больше давления холодного газа на её зеркальную сторону.

Для обнаружения именно давления света необходимы были более тонкие опыты, которые были поставлены Петром Николаевичем Лебедевым 1900-1901 году [3][4][5] (рисунок 3).

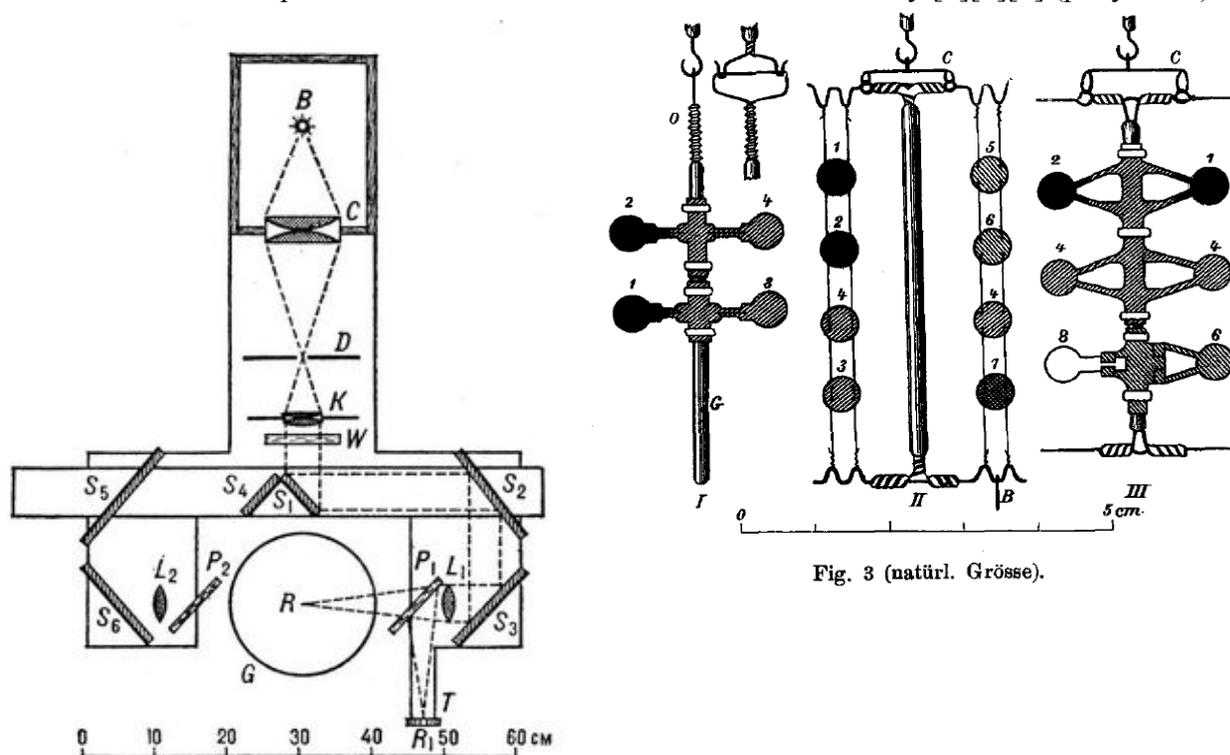


Fig. 3 (natürl. Grösse).

Рисунок 3: Схема постановки опыта Лебедева по давлению света. Слева: схема оптической части установки, справа: варианты подвешиваемых коромысел с дисками разных типов. Материал дисков: 1 — густо патиновая платина толщиной 0.1 мм, 2 — платина толщиной 0.1 мм, патинованная в 5 раз светлее, 3 — не патинованная платина толщиной 0.1 мм, 4 — не патинованная платина толщиной 0.02 мм, 5 — алюминий толщиной 0.1 мм, 6 — алюминий толщиной 0.02 мм, 7 — никель толщиной 0.02 мм, 8 — слюда, толщиной менее 0.01 мм. По статье [3].

В опытах Лебедева были предприняты специальные меры по получению вакуума более глубокого, чем в опытах Крукса<sup>3</sup>, однако они тоже были недостаточны для полного устранения сил, не связанных со световым давлением. Эти силы, связанные с остаточным газом, могут быть двух видов: силы, связанные с конвекцией газа в сосуде при нагреве диска, и радиометрические силы, проявляющиеся в опыте Крукса. Для устранения сил, связанных с конвекционными токами остаточного газа, Лебедев применил остроумный экспериментальный трюк. Крылышки из разных материалов (рисунок 3) подвешивались на стеклянной нити в откачанном объёме и свет от внешнего источника (дугового разряда) мог передвиганием салазок с зеркалами направляться на одну или другую сторону крылышек. Так как конвекционные силы зависят только от нагрева диска (и может какого-то несовершенства его монтажа, неизменного в опыте) и не зависят от направления падения света, то направление силы, связанной с конвекцией не меняет знак при изменении освещаемой стороны, а вот сила давления света и радиометрическая сила меняли

3 Напомним, что эти опыты делались более 100 лет назад и достижение глубокого вакуума ограничивалось имеющимися средствами откачки газов. Одним из способов улучшения откачки было то, что Лебедев поместил в откачиваемый объём каплю ртути, которая нагревалась при достижении предельного вакуума. Пары испаряющейся ртути откачивались насосом и при этом пары ртути «подхватывали» остаточный газ в полости. Это было прообразом диффузионных вакуумных насосов. В результате достигалось давление менее 0.0001 мм ртутного столба.

направление. Сравнением сил, действующих на крылышко в этих опытах, можно исключить конвекционные эффекты. Радиометрические эффекты можно исключить улучшением вакуума и, до некоторой степени, учесть при сравнении данных с крылышками разной толщины: давление света от толщины крылышек не зависит, а вот радиометрический эффект, связанный с различием температур освещенной и неосвещенной стороны зависит от теплопроводности и толщины.

В результате Лебедеву удалось показать, что на зеркальную поверхность действует большая сила, чем на зачерненную и измерить эту силу. Результат оказался завышен примерно на 20% по сравнению с предсказаниями максвелловской теории [5], что показывает неисключенный до конца вклад радиометрических сил.

Необходимо отметить, что этот опыт очень точный и его корректное проведение потребовало очень высококачественной экспериментальной работы. Лорд Кельвин говорил об опытах Лебедева [4]: *„Вы, может быть, знаете, что я всю жизнь воевал с Максвеллом<sup>4</sup>, не признавая его светового давления, и вот ваш Лебедев заставил меня сдаться перед его опытами“*.

## Давление света в космосе, астрофизике, и в лаборатории

### Солнечный парус

Несмотря на малую величину, давление света часто рассматривается в серьёзных и фантастических проектах, как движитель в космических полётах. Потенциальная выгода от такого движителя заключается в отсутствии необходимости расходовать ресурсы космического корабля — солнечный свет в этом смысле является «бесплатным» ресурсом, неограниченным во времени. Поэтому в некоторых случаях такой движитель представляет потенциальный интерес.

На 2012 год был проведён ряд опытов по развёртыванию «солнечного паруса» («Nanosail-D2» НАСА, запущен 20.11.2010) . Давление солнечного излучения на солнечные батареи использовалось зондом «Messenger» (запущен 3 августа 2004) во время полёта к Меркурию для коррекции орбиты. Зонд IKAROS японского космического агентства [6] (рисунки 4, 5) использовал солнечный парус при полёте к Венере (сайт проекта [7]). Масса зонда 315 кг, параметры солнечного паруса: диагональ квадрата 20 метров, толщина 7.5 мкм.

---

4 Отметим ещё раз — лорд Кельвин ссылается не на квантовую теорию, а на классическую максвелловскую электродинамику, абсолютно правильно предсказывающую и явление светового давления, и его величину.

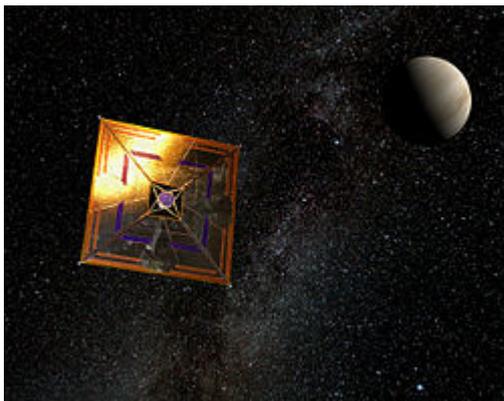


Рисунок 4: Космический зонд IKAROS с развёрнутым солнечным парусом. Представление художника, с сайта [6].

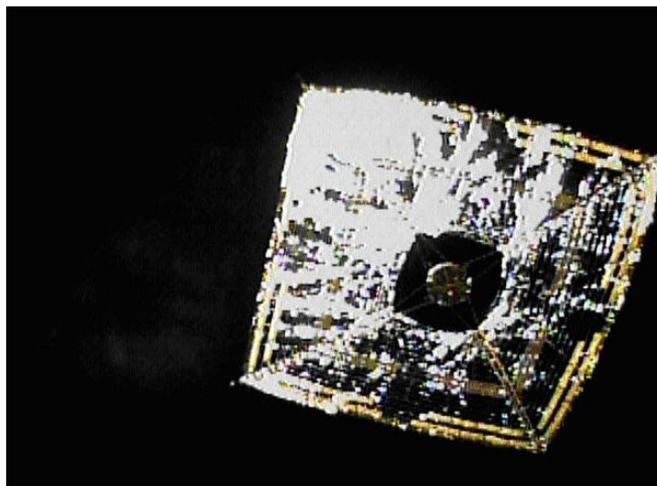


Рисунок 5: Фотография зонда IKAROS с развёрнутым солнечным парусом. Диагональ квадратного паруса равна 20 метрам. С сайта [7]

### Радиационное давление в звёздах и около звёзд

Без специального доказательства отметим, что давления света является одним из механизмов, из-за которого кометный хвост при приближении к Солнцу всегда направлен от Солнца.

Кроме того, давление излучения от очень горячего ядра звезды является силой, противодействующей гравитационному сжатию звезды.

### «Оптические пинцеты» для работы с микро- и нано- частицами

Отметим также ещё один оптический (и, как и давление света, строго говоря, не квантовый) способ манипуляции наночастицами и даже отдельными атомами, получивший название оптического пинцета [8].

Рассмотрим для простоты объект в форме маленькой сферы из диэлектрического материала с диэлектрической восприимчивостью  $\epsilon > 1$ . Напомним, что в среде, состоящей из поляризуемых молекул, молекулы, как стрелки компаса, выстраиваются вдоль силовых линий электрического поля. Для простоты положим, что электрическое поле создаётся обкладками плоского конденсатора. Тогда положительный полюс молекул поляризуемой среды оказывается направлен к отрицательной обкладке создающего электрическое поле конденсатора. В результате, на поверхности тела возникают поляризационные заряды: положительный со стороны отрицательной обкладки конденсатора и отрицательный со стороны положительной обкладки. Так как такая ориентация полярности наведённого заряда очевидно выгодна, то энергия диэлектрической сферы в электрическом поле должна уменьшаться.<sup>5</sup> Так как в равновесии энергия системы стремится к минимуму, это означает, что диэлектрик должен втягиваться в область более сильного электрического поля.

<sup>5</sup> Можно легко сообразить, что для тела без собственного электрического дипольного момента этот выигрыш в энергии  $\delta U \propto -(\epsilon - 1)E^2$ .

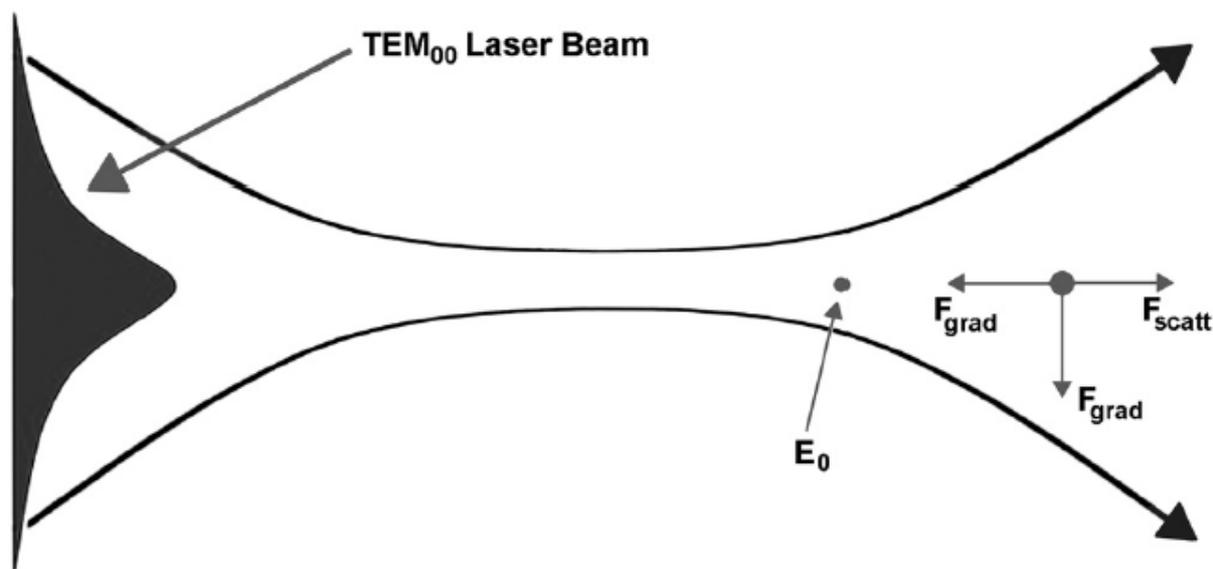


Рисунок 6: Принцип работы оптической ловушки и оптического пинцета. Из статьи [8].

Если сфокусировать световой пучок, то вблизи фокуса линзы с учётом волновых эффектов профиль пучка будет иметь вид «перетяжки» (рисунок 6). В узком месте интенсивность пучка максимальна, следовательно, максимальна и амплитуда электрического поля волны. А это значит, что наша сфера будет втягиваться в фокальную область. Этой силе будет противодействовать давление света на сферу. В результате, сфера займёт некоторое равновесное положение. Для более точной стабилизации используется несколько скрещенных пучков.

Положением частицы можно управлять, изменяя профиль пучка или его интенсивность. При перемещении пучка сфера будет смещаться вместе с ним. Таким образом, возникает инструмент для перемещения микро- и нано- объектов без непосредственного контакта с ними — «оптический пинцет».

## Эффект Комптона.

### Опыт А.Комптона и его описание

Мы рассмотрели два эффекта: давление света, для описания которого необходимо рассматривать импульс электромагнитной волны, и фотоэффект, для описания которого необходимо рассматривать энергию кванта электромагнитного излучения. Существует ещё один эффект взаимодействия излучения с веществом, при котором важны и сохранение энергии, и сохранение импульса. Это эффект Комптона, за объяснение которого А.Комптон у была присуждена Нобелевская премия по физике 1927 года.

При исследовании рассеяния рентгеновского излучения было обнаружено, что рассеянные рентгеновские лучи оказываются «мягче» (то есть имеют большую длину волны или меньшую частоту), чем падающие. Классическая электродинамика не может объяснить этого

сдвига частоты — вторичные волны, созданные электроном попавшим в поле падающей волны, должны быть на той же частоте, что и падающая волна. Приведём здесь типичные значения экспериментальных данных, известных А.Комптону [9]: при длине волны падающего излучения  $0.708 \text{ \AA}$  максимальное изменение длины волны рассеянного света составляет лишь  $0.044 \text{ \AA}$ , максимальное изменение длины волны наблюдается при рассеянии назад (в направлении на источник излучения).

Для объяснения этого явления необходимо рассмотреть взаимодействие электрона с падающим на него фотоном с одновременным учётом законов сохранения энергии и импульса. Электрон до процесса рассеяния мы будем считать свободным и покоящимся. Реально рассеяние происходит на электроне, находящемся на какой-то из атомных орбиталей. Однако энергия кванта падающего рентгеновского излучения (примерно 18 кэВ в опытах, на основании которых Комптон разработал теорию этого явления) и энергия, передаваемая электрону (по приведённым выше данным, изменение энергий кванта при рассеянии составляет около 1кэВ), заметно больше энергии связи электрона в атоме ( $\sim 1 \text{ эВ}$ ), поэтому энергией связи можно при рассмотрении этой задачи пренебречь. Также пренебрежём релятивистскими эффектами (оправдано тем, что передаваемая энергия  $\sim 1\text{кэВ}$  много меньше массы покоя электрона 511кэВ) и будем считать электрон подчиняющимся классической механике.

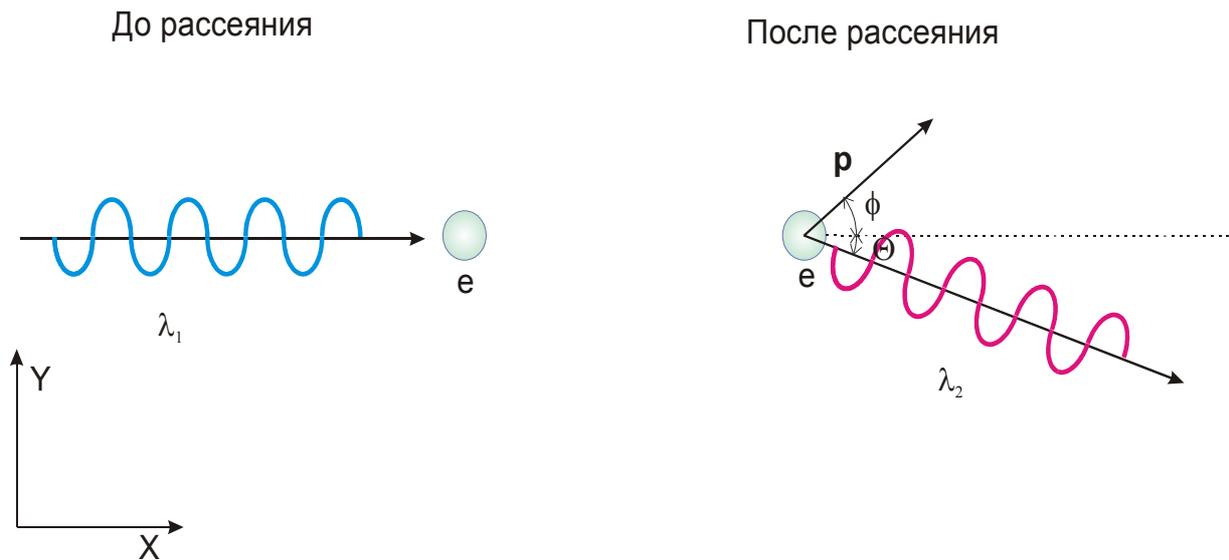


Рисунок 7: К описанию эффекта Комптона.

Процесс рассеяния изображён на рисунке 7. Пусть  $\Theta$  — угол отклонения рассеянных квантов от направления падающего излучения. По рисунку 7 этот угол отсчитывается против нормального направления отсчёта углов, что позднее приведёт к появлению знака «минус» в уравнениях для проекции импульса. Закон сохранения энергии в процессе рассеяния:

$$h \nu_1 = h \nu_2 + \frac{p^2}{2m},$$

здесь  $p$  — импульс, приобретённый электроном.

Закон сохранения импульса:

$$\begin{aligned} OX: \frac{h\nu_1}{c} &= \frac{h\nu_2}{c} \cdot \cos \Theta + p_x \\ OY: 0 &= -\frac{h\nu_2}{c} \cdot \sin \Theta + p_y \end{aligned}$$

Минус во втором уравнении связан с выбором направления отсчёта угла  $\Theta$ . Преобразуем уравнения:

$$p^2 = p_x^2 + p_y^2 = \left(\frac{h\nu_1}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu_2}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2\nu_1\nu_2}{c^2} \cos \Theta$$

С другой стороны, из закона сохранения энергии:

$$p^2 = 2m h(\nu_1 - \nu_2)$$

Приравняем:

$$2m h(\nu_1 - \nu_2) = \left(\frac{h\nu_1}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu_2}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2\nu_1\nu_2}{c^2} \cos \Theta$$

Домножим обе части равенства на  $\frac{c}{2m h \nu_1 \nu_2}$  и воспользуемся тем, что  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ :

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{2mc} \frac{\nu_1}{\nu_2} + \frac{h}{2mc} \frac{\nu_2}{\nu_1} - \frac{h}{mc} \cos \Theta$$

В опыте Комптона эффект изменения длины волны был мал, тогда в правой части равенства можно пренебречь отличием  $\nu_1$  и  $\nu_2$ . Получим:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_0(1 - \cos \Theta),$$

где  $\lambda_0 = h/(mc) = 0.024 \text{ \AA}$  так называемая комптоновская длина волны электрона. Отметим, что полученный эффект действительно квантовый: при обращении в ноль постоянной Планка сдвиг длины волны также обращается в ноль — то есть переходит в результат классической электродинамики.

В опытах Комптона использовалось относительно низкоэнергетичное излучение с энергией кванта 18 кэВ (длина волны около  $0.7 \text{ \AA}$ ). В этих условиях масса покоя электрона  $mc^2 = 511 \text{ кэВ}$  действительно заметно больше энергии кванта, что оправдывает нерелятивистское рассмотрение и соответствует малости сдвига частоты. Несколько неожиданно, сдвиг длины волны зависит только от угла рассеяния, но не от длины волны падающего излучения. Это было подтверждено в опытах Комптона, где длина волны падающего излучения изменялась от  $0.7 \text{ \AA}$  до  $0.025 \text{ \AA}$  — и во всех случаях при рассеянии на  $90^\circ$  увеличение длины волны неизменно составляло около  $0.03 \text{ \AA}$  [9].

Отметим без доказательства, что точное решение задачи о рассеянии фотона на электроне в релятивистской теории (то есть без использования предположения о малости скорости электрона  $v \ll c$ ) приводит к такому же ответу для изменения длины волны фотона:

$\lambda' = \lambda + \lambda_0(1 - \cos \Theta)$ , где  $\lambda$  — длина волны падающего, а  $\lambda'$  — длина волны рассеянного излучения.

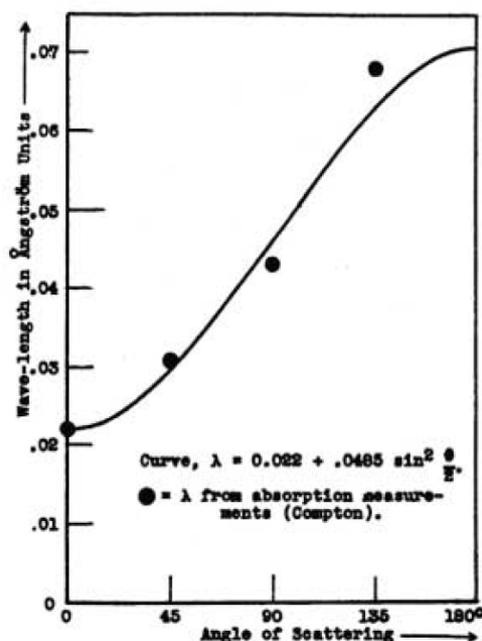


Fig. 5. The wave-length of scattered  $\gamma$ -rays at different angles with the primary beam, showing an increase at large angles similar to a Doppler effect.

Рисунок 8: Экспериментальные данные А.Комптона. Из статьи [9].

Экспериментальная картина (рисунок 8) соответствует нашему теоретическому расчёту. Эффект Комптона является одним из способов измерения массы электрона: длина волн рентгеновского излучения может быть определена по дифракции на кристалле, постоянная Планка и скорость света — мировые константы, угол  $\Theta$  определяется геометрией опыта. Эффект Комптона демонстрирует, что в некоторых случаях взаимодействие электромагнитного излучения с веществом происходит практически как соударение шаров в механике.

## Разновидности и применения эффекта Комптона: обратный эффект Комптона, эффект Зельдовича-Сюняева, детектирование нейтрино

### Обратный эффект Комптона

Обратный эффект Комптона заключается в том, что при рассеянии на высокоэнергичных электронах фотоны могут существенно увеличивать свою энергию, забирая энергию у электронов.

### Эффект Сюняева-Зельдовича

Астрофизическим проявлением обратного эффекта Комптона является эффект Сюняева-Зельдовича, названный в честь предсказавших его в 1969 году учёных Р. А. Сюняева и Я. Б. Зельдовича.

Этот эффект связан с тем, что в нашей Вселенной присутствует так называемое реликтовое

излучение: фотоны с характерной энергией, эквивалентной температуре 2.7К (субмиллиметровая длина волны). Эти фотоны возникли на ранних стадиях развития Вселенной, примерно через 400,000 лет после Большого Взрыва (возраст Вселенной по современным представлениям равен 14.7 млрд. лет). В каждом кубическом сантиметре присутствует примерно 400-500 фотонов этого излучения. Спектр реликтового излучения измеряется с большой точностью наземными и космическими обсерваториями. Сюняев и Зельдович предсказали, что в этом спектре должны наблюдаться искажения, связанные с рассеянием этих низкоэнергичных фотонов на ионизированной межзвёздной плазме: из-за приобретения дополнительной энергии спектр немного смещается в область больших энергий [10]. Эти эффекты невелики и требуют очень точных измерений, но эти измерения выполняются (рисунок 9). Таким образом, квантовый эффект Комптона оказывается инструментом для получения информации о свойствах далёких галактических кластеров.

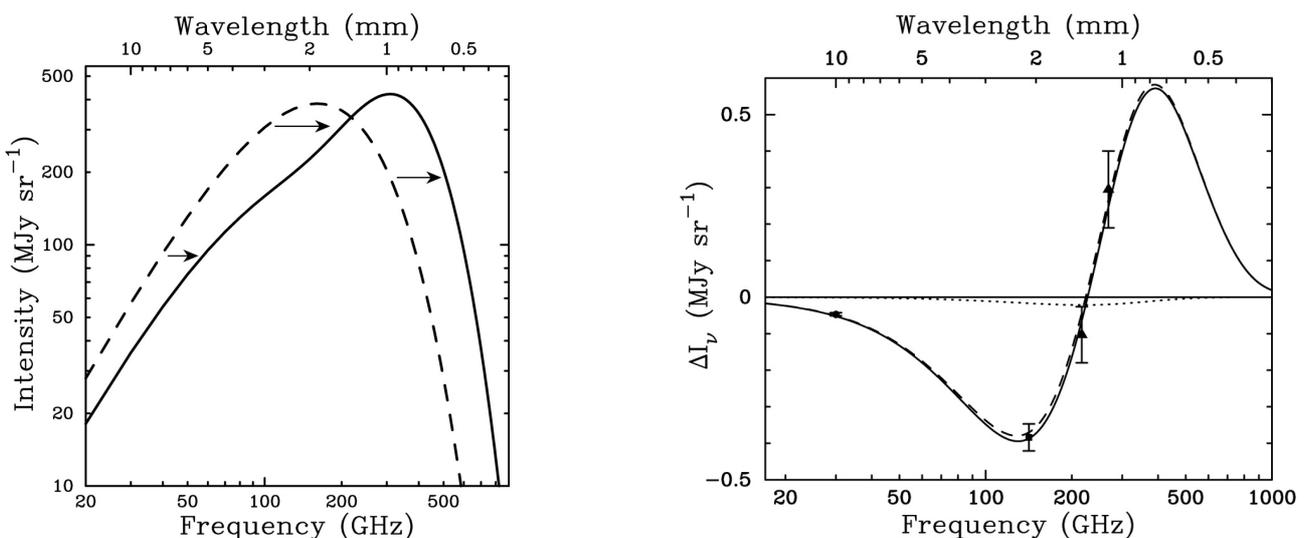


Рисунок 9 Слева: модельное изменение спектра реликтового излучения при прохождении через галактический кластер с размером в 1000 раз больше, чем типичный галактический кластер. Справа: наблюдаемое изменение спектра реликтового излучения (символы) при прохождении через кластер галактик Abell2163 (расстояние 2700 млн. свет, созвездие Змееносца) по сравнению со спектром реликтового излучения из «свободного» космоса и теоретическое описание (кривые). Из статьи [10].

### Детектирование нейтрино

Ещё одно применение эффекта Комптона связано с детектированием одной из самых «неуловимых» частиц ядерной физики — нейтрино. Хотя через каждый квадратный сантиметр на Земле проходит в секунду около 60 миллиардов нейтрино, рождающихся в термоядерных реакциях на Солнце, нейтрино почти не вступают в реакции с веществом: длина свободного пробега нейтрино в воде составляет около 100 св.лет.

Нейтрино имеют очень маленькую массу<sup>6</sup>, так что в очень многих случаях их можно считать безмассовыми частицами. Задача о рассеянии безмассовой частицы на электроном формально

6 Наличие массы нейтрино однозначно доказывается наблюдаемым эффектом осцилляции нейтрино. Сама масса нейтрино точно не измерена, но известно, что она много меньше массы самой лёгкой из элементарных частиц — электрона. Масса покоя электрона ( $m_e c^2$ ) составляет около 511 кэВ, а верхняя оценка массы нейтрино составляет менее 1 эВ.

ничем не отличается от рассмотренной нами задачи о рассеянии безмассового фотона на электроне: это рассеяние может быть неупругим и часть энергии нейтрино будет передана электрону.

Если переданная энергия окажется настолько велика, что скорость движения электрона окажется быстрее скорости света в среде<sup>7</sup>, то электрон начнёт излучать электромагнитные волны (теория относительности запрещает только движение со скоростью, большей скорости света *в вакууме*). Это излучение (черенковское излучение<sup>8</sup>) аналогично звуковым волнам, излучаемым сверхзвуковым самолётом при движении в атмосфере. Возникающее свечение может быть зафиксировано с помощью фотоэлектронных умножителей и таким образом может быть обнаружен пролёт нейтрино. Так как наибольшая передача энергии происходит при выбивании электрона по ходу движения частицы и именно такие электроны дают максимально яркое свечение, то удаётся определить ещё и направление, с которого прилетело нейтрино. Таким образом, фундаментальный квантовый эффект становится инструментом в других областях физики.

Одним из примеров такого детектора нейтрино является расположенный в Японии детектор СуперКамиоканде [11]. Для исключения внешних наводок детектор находится в шахте глубиной 1000 метров. Сам детектор состоит из цилиндрического танка диаметром 39 метров и высотой 41 метр, заполненного примерно 50,000 тонн воды. Для обнаружения вспышек излучения установлено более 10,000 ФЭУ. Вид этого детектора в момент технического обслуживания показан на рисунке 10.

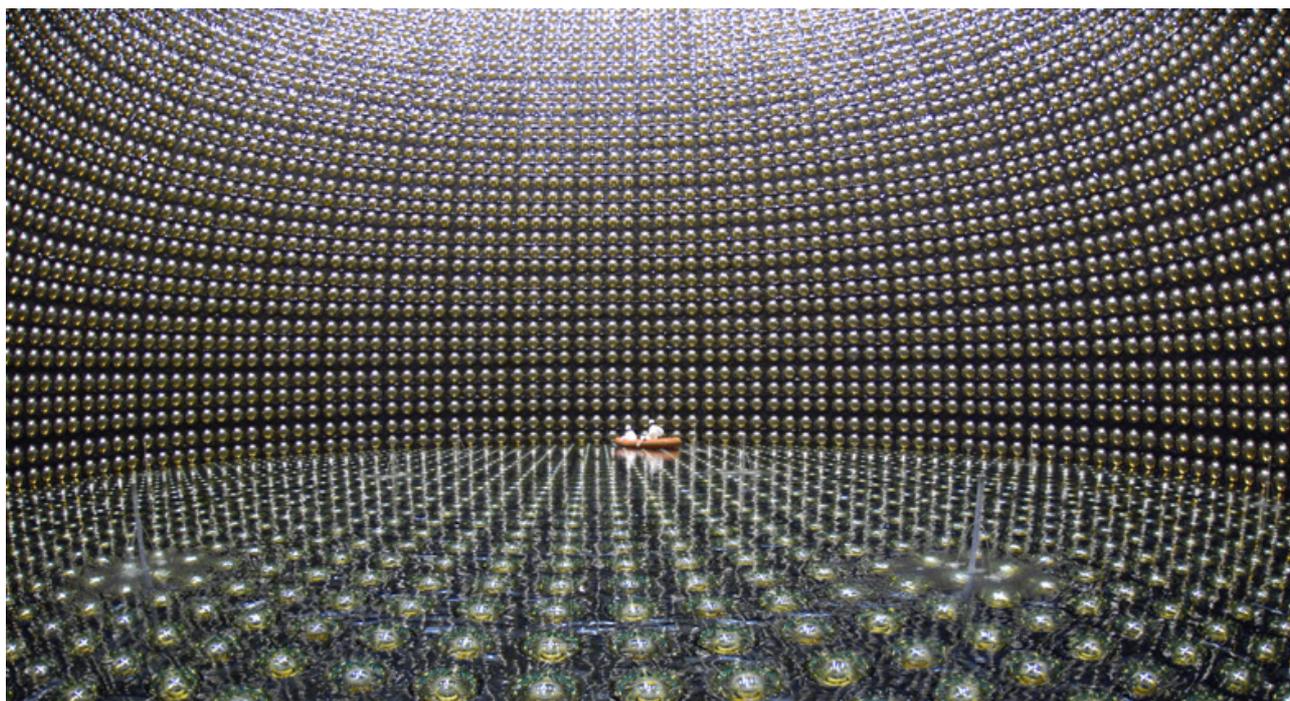


Рисунок 10: Обслуживание детектора СуперКамиоканде. С сайта [11].

7 В среде с показателем преломления  $n$  скорость света  $c' = c/n$ . Показатель преломления воды равен примерно 1.3 в оптическом диапазоне.

8 Черенковское излучение также называют эффектом Вавилова-Черенкова. Обнаруживший его Павел Алексеевич Черенков совместно с предложившими его объяснение И.Е.Франком и И.М.Таммом стал Нобелевским лауреатом по физике 1958 года.