

539.121.72

ЭФФЕКТ КАПИЦЫ—ДИРАКА

В 1933 г. в небольшой заметке ¹ П. Л. Капица и П. А. М. Дирак показали возможность отражения свободных электронов от стоячей световой волны. Примечательно, что они сразу подчеркнули наиболее интересную особенность эффекта — наблюдение индуцированного рассеяния излучения, которое до тех пор (и долгое время после) никогда экспериментально не наблюдалось. В последнее время эффект Капицы — Дирака удалось наблюдать экспериментально благодаря созданию мощных лазеров ².

Идея эксперимента, предложенного Капицей и Дираком, показана на рисунке. Электронный луч от источника электронов 1 ускоряется потенциалом между источником и диафрагмой 2 и затем пересекает стоячую световую волну 3, образованную отражением луча света от зеркала 4. Часть электронов испытывает брэгговское отражение от стоячей световой волны как от пространственной решетки с периодом $\lambda_{св}/2$ ($\lambda_{св}$ — длина световой волны) и вместо точки 5 приходит в точку 5'.

Капица и Дирак дали следующее теоретическое рассмотрение эффекта. Стоячая световая волна представляет собой две бегущие навстречу волны одинаковой частоты. Каждая из бегущих волн вызывает комптоновские переходы электронов, в которых электрон поглощает фотон из бегущей волны и переизлучает его в произвольном направлении, испытывая при этом отдачу, отклоняющую его от первоначального пути. Для двух бегущих волн при определенной скорости и направлении движения электронов возникает новый эффект — индуцированное комптоновское рассеяние, в котором фотон поглощается из одной бегущей световой волны, а его переизлучение индуцируется другой бегущей волной, причем электрон снова испытывает отдачу. Вероятность этого процесса, в отличие от обычного комптоновского рассеяния (вероятность которого пропорциональна интенсивности одной из бегущих волн), пропорциональна произведению интенсивностей бегущих волн. Ясно, что в слабом световом поле наиболее вероятен обычный комpton-эффект, а в сильном световом поле преобладает индуцированный эффект.

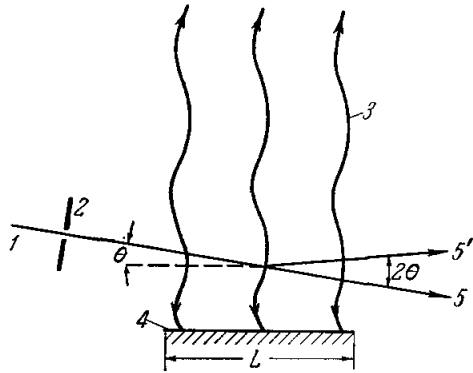


Схема экспериментального наблюдения эффекта Капицы—Дирака.

- 1 — источник электронов; 2 — диафрагма;
- 3 — стоячая световая волна; 4 — зеркало;
- 5 — нерассеянный луч электронов; 5' — рассеянный луч электронов.

Закон сохранения энергии и импульса в данном случае сразу приводит к брэгговским условиям рассеяния электронных волн. Переизлученный в индуцированном процессе фотон должен иметь частоту и направление индуцирующей бегущей волны. Следовательно, переизлученный фотон должен иметь ту же самую частоту ν , как и поглощенный фотон, и двигаться в противоположном направлении. Передаваемый электрону импульс равен $2h\nu/c$ и направлен вдоль светового луча, а передаваемая энергия равна нулю. Отсюда следует, что электронные волны должны отражаться от поверхностей стоячей волны с углом отражения, равным углу падения, а длина волны электронных волн $\lambda_{эл}$ должна быть связана с углом падения θ (см. рисунок) соотношением

$$2 \frac{h\nu}{c} = 2 \frac{h}{\lambda_{эл}} \sin \theta, \text{ или } \lambda_{эл} = 2 \left(\frac{\lambda_{св}}{2} \right) \sin \theta, \quad (1)$$

представляющим собой условие брэгговского отражения первого порядка на решетке с периодом $\lambda_{св}/2$.

Капица и Дирак получили также выражение для вероятности индуцированного процесса из известного сечения для обычного комптоновского рассеяния, используя соотношение между коэффициентами Эйнштейна для индуцированного и спонтанного испускания. Найденное ими выражение для вероятности отражения электрона P имеет вид

$$P = \frac{e^4 L}{2m^2 c^2 h^2 v^4} \int I(\nu) I'(\nu) d\nu, \quad (2)$$

где v — скорость электрона, $I(\nu)$ и $I'(\nu)$ — спектральные плотности энергии бегущих волн (в $\text{эрг/сек} \cdot \text{см}^2 \text{ гц}$).

Для обычных непрерывных источников света, которые испускают не больше 1 вт в спектральной линии с шириной $\sim 0,1 \text{ \AA}$, вероятность отклонения электрона $\sim 10^{-14} \div 10^{-15}$. Хотя для импульсных источников света можно получить некоторое увеличение вероятности, тем не менее доля отраженных электронов остается чрезвычайно малой. В связи с этим Капица и Дирак подчеркнули, что «эксперимент находится на грани возможного и выполнить его будет очень трудно». Создание мощных импульсных лазеров, испускающих $\sim 10^8 \text{ вт/см}^2$ в спектральной области $\sim 10^{-2} \text{ \AA}$, сделало возможным эксперимент Капицы — Дирака с отклонением значительной части электронов.

Впервые эффект Капицы — Дирака наблюдался экспериментально Бартеллом, Томсоном и Роскосом². В эксперименте² луч электронов с энергией 1,65 *кэв* пересекал под прямым углом резонатор рубинового лазера, испускавшего энергию 30 *дж* при интенсивности импульса $\sim 10^8$ *вт/см*² внутри резонатора. Для достижения максимальной интенсивности стоячей волны внутри резонатора в лазере использовались полностью отражающие (99,9%) внешние зеркала. В результате достаточно большая мощность достигалась даже без модуляции добротности. Углы рассеяния измерялись путем сканирования электронов мимо цели сцинтилляционного детектора. Угол рассеяния 2θ составлял всего лишь 10^{-4} *рад*. Поэтому было обращено особое внимание на коллимацию луча и сохранение его направленности во время лазерной вспышки. Эти нетривиальные требования были выполнены, и возмущения электронного луча не превышали малой доли 2θ на сканирование.

Эффект отклонения значительной части электронов наблюдался в 200 лазерных вспышках. Для устранения возможности ложного эффекта были проведены следующие опыты. В резонатор вводилась узкая металлическая полоска, экранировавшая от света путь электронного луча внутри резонатора. В этом случае эффект пропадал. Однако он появлялся вновь, если металлическая полоска вращалась вокруг оси лазерного луча так, чтобы больше не затенять весь путь электронного луча. Интенсивность луча лазера была недостаточной, чтобы получить наблюдаемый эффект за счет обычного комптоновского рассеяния. Все это подтверждает, что наблюдался именно эффект Капицы — Дирака.

Точность эксперимента² была недостаточна для однозначной проверки справедливости брэгговского условия (1) для угла рассеяния. Это связано с тем, что, во-первых, установка не измеряла время и угол рассеяния независимо и, во-вторых, ширина электронного луча хотя и позволяла достигнуть разрешения 10^{-4} *рад* при благоприятных условиях, но была сравнима с ожидаемыми углами отклонения. Авторы эксперимента надеются модифицировать установку для количественного исследования эффекта Капицы — Дирака.

Весьма интересна наблюдавшаяся в работе² нерегулярная четкая структура рассеянного электронного луча. Электроны отклоняются на углы, соответствующие четвертому и большему дифракционным порядкам, что указывает на обмен импульсом с четырьмя и более фотонами при достаточной интенсивности поля. Схема процесса, дающего брэгговское отражение *n*-го порядка, такова:

$$e^- + \overbrace{\gamma + \gamma + \dots + \gamma}^n \rightarrow e^- + \overbrace{\gamma' + \gamma' + \dots + \gamma'}^n. \quad (3)$$

Другие процессы, например,

$$\begin{aligned} e^- + \gamma &\rightarrow e^- + \gamma' + \gamma', \\ e^- + \gamma + \gamma &\rightarrow e^- + \gamma', \end{aligned} \quad (4)$$

хотя и вероятны в сильных полях, но кинематически запрещены в эксперименте Капицы — Дирака.

Эффект Капицы — Дирака является первым примером индуцированного взаимодействия свободных электронов и фотонов. В последнее время появился целый ряд теоретических работ³⁻¹⁰, в которых рассматриваются возможные эффекты таких взаимодействий.

Отметим последнюю работу Эберли¹⁰, в которой предлагается с помощью эксперимента Капицы — Дирака обнаружить нелинейный комптоновский сдвиг частоты рассеянного фотона⁶⁻⁹.

Сфера проявления эффекта Капицы — Дирака в дальнейшем, несомненно, будет расширяться. В качестве иллюстрации можно привести пример. Электронные волны в кристалле, находящемся в поле сильной стоячей световой волны, помимо дифракции на кристаллической решетке, могут (при подходящей скорости и направлении движения) дифрагировать и на самой световой волне. Это может привести к расщеплению сплошного спектра электронных энергий на чередующиеся разрешенные и запрещенные зоны.

Правда, здесь имеются два следующих обстоятельства. Во-первых, ширина зон невелика и, во-вторых, расщепление за счет эффекта Капицы — Дирака может оказаться замаскированным расщеплением, вызванным периодической деформацией самого кристалла в сильном световом поле, например, из-за электроострикции, ибо периодическая деформация кристаллической решетки, как известно¹¹, ведет к аналогичному расщеплению сплошного спектра.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. P. L. Каpиtzа, P. A. M. Dirac, Proc. Cambridge Phil. Soc. **29**, 297 (1933).
 2. L. S. Bartell, H. B. Thompson, R. R. Roskos, Phys. Rev. Letts. **14**, 851 (1965).
 3. Z. Freid, W. M. Frank, Nuovo cimento **27**, 218 (1963).
 4. H. R. Reiss, J. Math. Phys. **3**, 59 (1962).
 5. А. И. Ипкинoв, В. И. Ритус, ЖЭТФ **46**, 776 (1964).
 6. L. S. Brown, T. W. B. Kibble, Phys. Rev. **A133**, 705 (1964).
 7. I. I. Goldman, Phys. Letts. **8**, 103 (1964).
 8. Z. Freid, J. H. Eberly, Phys. Rev. **B136**, 871 (1964).
 9. T. W. B. Kibble, Phys. Rev. **B138**, B740 (1965).
 10. J. H. Eberly, Phys. Rev. Letts. **15**, 91 (1965).
 11. Л. В. Релдыш, ФТТ **4**, 2265 (1962).
-