

# Релятивистское дополнение внешнего фотоэлектрического эффекта

---

*Халецкий Михаил*

*Израиль, г. HADERA, 2023 г.*

( [hal123mich@gmail.com](mailto:hal123mich@gmail.com) )

## АННОТАЦИЯ

Фотоэлектрический эффект описывается уравнением Эйнштейна на основе квантовых представлений. Скорости фотоэлектронов, выбитых из вещества, полагают нерелятивистскими (классическими). В настоящей статье обсуждается уравнение Эйнштейна в диапазоне релятивистских скоростей, т.е. для значений, которые уже можно сравнивать со скоростью света.

## Содержание

1. Классификация скоростей
2. Классификация энергий
3. Внешний фотоэффект
4. Источники информации

## 1. Классификация скоростей

Скорости поступательного движения элементарных частиц разделяются на три основных диапазона: классический; релятивистский; ультрарелятивистский.

1. Классический,  $0 \leq v \leq 1.094 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ .
2. Релятивистский,  $1.094 \cdot 10^6 \leq v \leq 10 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ .
3. Ультрарелятивистский,  $10 \cdot 10^6 \leq v \leq 300 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ .

Элементарная Теория Относительности (ЭТО) устанавливает точное значение границы между классическими и релятивистскими скоростями,  $v = 1.0946 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$  [1]. Граница между релятивистскими и ультрарелятивистскими диапазонами имеет условное значение,  $v = 10 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ .

## 2. Классификация энергий

Форма записи полной кинетической энергии частицы в Элементарной Теории Относительности [2]:

$$E_k = E_s + E_r - E_h. \quad (1)$$

Здесь:

$$E_s = \frac{mv^2}{2}; \text{ — энергия поступательного движения частицы;}$$

$$E_r = mc^2 - \frac{mc^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}}; \text{ — энергия собственного кручения частицы;}$$

$$E_h = \frac{\alpha^2}{8} \frac{mc^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}}; \text{ — энергия прецессии собственного кручения частицы.}$$

Форму записи кинетической энергии можно упростить в зависимости от нахождения частицы в определенном интервале скоростей. Переход частицы из релятивистского состояния в классическое происходит скачком:  $E_r = 0$ ;  $E_h = 0$ ;  $v = 1.094 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ . Для электрона в вакууме можно выделить две основные формы записи полной кинетической энергии.

- 1) Классическая форма:

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2}.$$

- 2) Релятивистская форма:

$$E_s = \frac{m_e v^2}{2};$$

$$E_r = m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}} \cong \frac{m_e v^2}{2}; \quad E_h = \frac{\alpha^2}{8} \frac{m_e c^2}{\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}} \cong 3.4 \text{ eV};$$

$$E_k = E_s + E_r - E_h \cong m_e v^2 - 3.4 \text{ eV}. \quad (2)$$

Энергия прецессии сильно подавляется постоянной тонкой структуры  $\alpha$  и слабо зависит от скорости поступательного движения. Численное значение  $E_h = 3,4 \text{ eV}$  равно среднему значению данной энергии на границах релятивистского диапазона скоростей. При описании внешнего фотоэффекта, ультрарелятивистские интервалы энергии и скорости не используются. Все виды энергии выражаются в несистемных единицах – электрон-вольты.

### 3. Внешний фотоэффект

Внешний фотоэлектрический эффект хорошо описан в существующей научно-технической литературе и не нуждается в дополнительных комментариях. Уравнение Эйнштейна описывает внешний фотоэффект для нерелятивистского (классического) случая движения фотоэлектронов за пределами проводника. Фотоэлектроны выбиваются из металла под действием квантов внешнего электромагнитного излучения. Диапазон энергий фотонов, вызывающих фототок в вакууме, соответствует фиолетовому, ультрафиолетовому и сверхмягкому рентгеновскому излучению (меньше  $0,5 \text{ keV}$ )[3]. Скорости выбитых электронов могут существенно превышать верхнюю границу классического диапазона скоростей. Возникает вопрос, как использовать уравнение Эйнштейна на случай релятивистского движения фотоэлектронов за пределами проводника.

1) Рассмотрим классическое уравнение Эйнштейна в нерелятивистском виде:

$$h\nu = E_k + \phi = \frac{m_e v_{max}^2}{2} + \phi. \quad (3)$$

Здесь:  $\phi$  – работа выхода электрона из проводника (eV);  $h\nu$  – энергия фотона падающего на проводник (eV);  $E_k$  – классическая кинетическая энергия электрона в вакууме (eV);  $m_e$  – масса электрона (kg);  $v_{max}$  – **максимальная классическая** скорость электрона; **ограничена сверху** релятивистским пределом  $1.094 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$ . Из уравнения и экспериментов определяется работа выхода электрона и длина волны красной границы фотоэффекта,  $\lambda_0 = hc/\phi$ . Скорость классического фотоэлектрона в вакууме определяется по формуле:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2(h\nu - \phi)}{m_e}} \cdot 1.6022 \cdot 10^{-19}; \text{ ms}^{-1}. \quad (4)$$

2) Заменим, в уравнении Эйнштейна, классическую форму записи кинетической энергии на её релятивистский вариант:

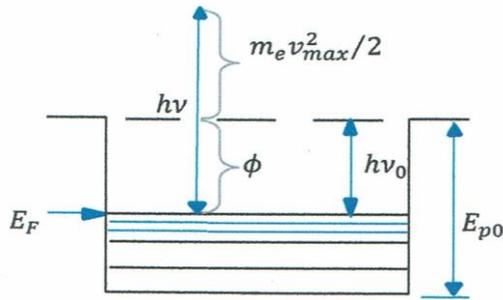
$$h\nu = E_k + \phi = m_e v_{min}^2 - 3.4 \text{ eV} + \phi. \quad (5)$$

Скорость релятивистского фотоэлектрона в вакууме:

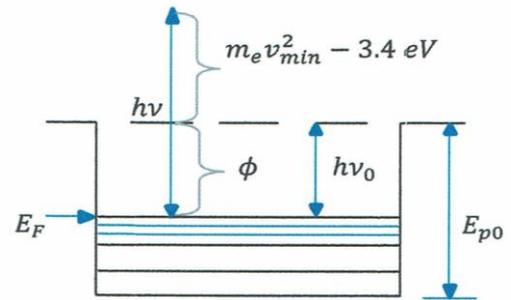
$$v_{min} = \sqrt{\frac{h\nu + 3.4 - \phi}{m_e}} \cdot 1.6022 \cdot 10^{-19}; \text{ ms}^{-1}. \quad (6)$$

Здесь:  $v_{min}$  – **минимальная релятивистская** скорость электрона; **ограничена снизу** пределом  $1.094 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$ . Ниже представлена графическая иллюстрация распределения

энергии фотона и электрона с учетом зонной теории металлов. Температура электронного газа внутри металла принимается равной абсолютному нулю,  $T = 0 \text{ K}$ .



А) Классическое распределение.



В) Релятивистское распределение.

Здесь:  $E_F$  — энергия (уровень) Ферми для электронов; отделяет валентную зону от зоны проводимости;  $E_{p0}$  — глубина потенциальной ямы в металле. Для металлов энергия Ферми, при комнатной температуре, находится в диапазоне от 3 до 10 eV. Переход электронов из классического состояния в релятивистское можно показать на примере расчета скорости фотоэлектронов цезия. Работа выхода для цезия равна 1.9 eV. Красная граница равна 653 nm. Ниже приводятся результаты расчета.

Энергия фотона, $E_\gamma$ eV.	Длина волны, $\lambda$ nm.	Частота колебаний, $\nu * 10^{14}$ Hz.	Скорости, $v$ km/s.	
			Классический случай, $v_{max}$	Релятивистский случай, $v_{min}$
1.9	653	4.59	<b>0</b>	773*
2.0	620	4.84	<b>188</b>	785*
2.5	496	6.05	<b>459</b>	834*
3.0	414	7.25	<b>622</b>	890*
3.5	354	8.46	<b>750</b>	938*
4.0	310	9.67	<b>859</b>	984*
4.5	276	10.88	<b>956</b>	1055*
5.0	248	12.09	<b>1090</b>	1069*
<b>5.3</b>	<b>234</b>	<b>12.82</b>	<b>1094</b>	<b>1094</b>
5.5	226	13.30	1125*	<b>1110</b>
6.0	207	14.51	1201*	<b>1149</b>
6.5	191	15.72	1272*	<b>1186</b>
7.0	177	16.93	1339*	<b>1223</b>
7.5	165	18.13	1403*	<b>1258</b>
8.0	155	19.34	1465*	<b>1293</b>
÷	÷	÷	÷	÷
÷	÷	÷	÷	÷
<b>567.1</b>	<b>2.19</b>	<b>1370</b>	14 100*	<b>10 000</b>

В таблице, жирным шрифтом, отмечены реальные классические и релятивистские значения скоростей. Звездочками отмечены фиктивные значения соответствующих скоростей.

При характерной энергии фотонов 5,3 eV, классические скорости фотоэлектронов цезия приобретают релятивистский характер. Скорость перехода электронов в релятивистское состояние всегда постоянная величина,  $v \cong 1094 \text{ km/s}$ . Характерные энергии фотонов зависят от природы облучаемого проводника и чистоты его поверхности. Значения характерных энергий определяется простой формулой,  $h\nu = 3.4 \text{ eV} + \phi$ . Процесс перехода частицы из релятивистского состояния в классическое и обратно очень похож на скрытую тепловую энергию агрегатных преобразований вещества. Для электрона при  $v_{max} = v_{min}$ , скрытая энергия перехода равна нулю:

$$Q_e = E_r - E_h = 0; \quad (7)$$

$$Q_e = \frac{m_e v^2}{2 \cdot 1.6022 \cdot 10^{-19}} - 3,4 \text{ eV} = \frac{9.11 \cdot 10^{-31} \cdot (1.094)^2 \cdot 10^{12}}{2 \cdot 1.6022 \cdot 10^{-19}} - 3.4 \text{ eV} = 0.$$

#### 4. Источники информации

1. Халецкий М. Б., Сборка Элементарной теории относительности., 2023г., <https://halmich.ru/wp-content/uploads/2023/08/C%D0%91%D0%9E%D0%A0%D0%9A%D0%90-%D1%80%D1%83%D1%81%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9.pdf> .
2. Халецкий М.Б., Постоянная тонкой структуры и прецессия электрона., 2021г., <https://halmich.ru/wp-content/uploads/2021/05/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F-%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B9-%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D1%8B.pdf> .
3. Источник сверхмягкого рентгеновского излучения – Википедия., 2023г., [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA\\_%D1%81%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BC%D1%8F%D0%B3%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE\\_%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE\\_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D1%81%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BC%D1%8F%D0%B3%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F) .
4. Фотоэффект – Википедия., 2023г., <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82> .
5. Мельникова Т.М., Немирович-Данченко Л.Ю., ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ., <https://file.ineo.tpu.ru/VLabs/KCE/Lab5/theory.pdf> .

