

# Аннигиляция

---

*Халецкий Михаил*

*Израиль, г. HADERA, 2026*

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

## АННУАЦИЯ

Аннигиляция, результат взаимодействия электрона и позитрона. Процесс физически наблюдаемый, но неоднозначный.

**Ключевые слова:** частица; электрон; позитрон; мюон; энергия; скорость;

## Содержание

1. Введение
2. Электроны
3. Мюоны
4. Проблема с энергией Черенкова
5. Процесс аннигиляции
6. Скорости мюонов
7. Резюме

## 1. Ведение

Аннигиляция, результат взаимодействия электрона и позитрона. Процесс физически наблюдаемый, но неоднозначный. Обе частицы одинаковые в механическом плане, но имеют противоположные электрические заряды и противоположные квантовые характеристики. Под квантовыми характеристиками понимаются: энергия релятивистского вращения ( $E_r$ ); энергия излучения Черенкова ( $E_h$ ); релятивистские импульсы ( $p_r, p_h$ ). В процессе взаимодействия полная кинетическая энергия обеих частиц трансформируется в электромагнитное излучение или другие коротко живущие, тяжелые частицы (мюоны, пионы, тау-лептоны). В основном аннигиляция происходит по двум направлениям:

- образуются два гамма-кванта по схеме:

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_n .$$

Здесь  $n$ , номер энергетического уровня электронов в вакууме. Энергия излучения в расчете на один электрон равна,  $E \approx 511.026 \pm 1 \text{ keV}$ .

- образуются два коротко живущих мюона по схеме:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+ + \mu^- .$$

Здесь  $\gamma^*$ , виртуальный фотон, который распадается на мюон и анти-мюон.

Перед аннигиляцией, электроны могут временно образовать связанную пару. Такое состояние частиц называют позитронием. В квантовой электродинамике различают орта-позитроний и пара-позитроний. Различие зависит от взаимной ориентации спинов.

## 2. Электроны

Разрешенные уровни энергии электронов в вакууме определяются через дискретные значения релятивистского параметра,  $x_n = \beta_n = v_n^2/c^2$ , [1]. Внешние поля отсутствуют. Столкновение лобовое, скорости частиц одинаковые. Собственная энергия  $m_e c^2$  играет роль постоянного коэффициента связи между полной кинетической энергией частицы и релятивистским параметром:

$$E_e = E_{se} + [E_{re} - E_{he}]; \quad (1)$$

$$E_{en} = \frac{1}{2} m_e c^2 \beta_n^2 + m_e c^2 \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1+\beta_n^2}} - \frac{\alpha^2}{8} \frac{1}{\sqrt{1+\beta_n^2}} \right].$$

Количество уровней энергии электрона в вакууме ограничено рядом,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, 15, 16$ . Здесь  $n$ , главное квантовое число. В пределах одного уровня, энергия частицы колеблется от метастабильного состояния до нестабильного. Для электрона, при  $n = 0$ , минимальная энергия  $E_{e0}$  составляет  $3.402 \text{ eV}$ , минимальная релятивистская скорость  $v_0$  равна  $1.09385 \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Значение скорости электрона в вакууме зависят только от квантового числа " $n$ " и

не зависят от массы, времени и координат в пространстве [1]. Выражение в квадратных скобках  $[E_{re} - E_{he}]$  определяет релятивистский характер частицы.

У релятивистского электрона в вакууме, энергия Черенкова  $E_{he}$  присутствует всегда, но может излучаться как отдельный фотон в другой среде, если скорость электрона превысит скорость света данной среды,  $v > c/n$ . Здесь "n", коэффициент преломления в данной среде. Потерянный квант энергии Черенкова компенсируется из собственной кинетической энергии электрона.

### 3. Мюоны

Из информации в Интернете и опытов на ускорителях, отношение массы мюона к массе электрона равно:

$$\frac{m_{\mu}}{m_e} \cong 206.768.$$

Измерения массы мюона проводились релятивистскими и **нерелятивистскими** методами. Следовательно, информации можно доверять. Найдем ограничение на минимальную энергию мюона:

$$E_{\mu 0} > E_{e 0} \frac{m_{\mu}}{m_e} = 3.402 \cdot 206.768 = 703.425. \quad (2)$$

Пропагандируется, что в собственной системе отсчета мюон живет  $2.2 \mu s$  (микросекунды). В лабораторной системе отсчета, время жизни мюона колеблется от десятков до сотен микросекунд. Все зависит от того, какие системы отсчета используются в опытах: неподвижные; подвижные; лабораторные; собственные и т. п. После изучения всех методов измерения времени жизни мюонна, автор не хочет комментировать полученные результаты. При отсутствии движения в собственной системе отсчета, материальная точка постоянно находится в начале координат, о каких часах и времени может идти речь! Ясно только одно, мюон самая долго живущая частица из всех коротко живущих частиц.

### 4. Проблема с энергией Черенкова

Для исходных электронов энергия Черенкова-Вавилова описывается формулой:

$$E_{he} = \frac{\alpha^2 m_e c^2}{8 \sqrt{1+\beta^2}}. \quad (3)$$

Диапазон изменения энергии, из опытных данных находится в пределах  $2 \div 6 eV$ . Расчет дает диапазон  $2.4 \div 3.4 eV$  для всего диапазона скоростей. Энергия Черенкова одинаковая у всех заряженных частиц. Для мюона, как тяжелого электрона, указанная энергия не должна зависеть от массы частицы. Сходство электрона и мюона:

- Заряд: Оба имеют заряд -1.
- Спин: Оба являются фермионами со спином  $1/2$ .
- Класс: Оба относятся к семейству лептонов (наряду с тау-частицей).

■ Электромагнитные свойства: их электромагнитное взаимодействие идентично.

Возникает **гипотетическое предположение** что мюон, это тот-же электрон с увеличенной продольной массой. Тогда полная кинетическая энергия мюона определяется выражением:

$$E_{\mu} = \frac{m_{\mu}c^2}{2}\beta_{\mu}^2 + m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1+\beta_{\mu}^2}} - \frac{\alpha^2}{8} \frac{m_e c^2}{\sqrt{1+\beta_{\mu}^2}}; \quad (4)$$

$$E_{\mu} = E_{s\mu} + E_{re} - E_{he}.$$

Релятивистская энергия мюона и электрона совпадают по форме записи. Сохраняются электромагнитные свойства и заряд электрона. По сути мюон сохраняют электромагнитный хвост электрона или позитрона с учетом изменения скорости. Это **предположение** противоречит существующим физическим представлениям о мюоне. Мюоны могут образоваться и при энергиях аннигиляции меньше  $m_{\mu}c^2$ . Если прав Эйнштейн, то мюоны с такой энергией должны существовать вечно. Но это не так! Значит прав Ньютон, нижний порог образования мюона:

$$E_{\mu 0} = \frac{m_{\mu}v_{\mu 0}^2}{2} > 703.425 \text{ eV}. \quad (5)$$

Здесь  $v_{\mu 0}$ , наименьшая релятивистская скорость мюона в вакууме.

## 5. Процесс аннигиляции

Релятивистские импульсы электрона и позитрона действуют в противоположных направлениях (паро-позитронное состояние). Релятивистские составляющие кинетической энергии  $E_{re}$  и  $E_{he}$  имеют противоположные знаки. Запишем формулы кинетической энергии в операторной форме:

$$\hat{E}_{e^-} = \frac{1}{2} m_e c^2 \beta^2 + m_e c^2 \left[ 1 < - > \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}} < - > \frac{\alpha^2}{8} \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}} \right]; \quad (6)$$

$$\hat{E}_{e^+} = \frac{1}{2} m_e c^2 \beta^2 + m_e c^2 \left[ 1 < + > \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}} < + > \frac{\alpha^2}{8} \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}} \right].$$

Для тождественных частиц (электрон и позитрон) арифметические знаки при релятивистских составляющих заменяются на операторы взаимной компенсации,  $< - >$ ,  $< + >$ . Найдем суммарную энергию столкновения античастиц:

$$\sum E = m_e c^2 \beta^2 + 2m_e c^2. \quad (7)$$

Выражение  $m_e c^2$ , максимальное значение релятивистской энергии электрона. Она же, максимальное значение **собственной электромагнитной энергии**. Часть этой энергии принимает участие в кинематике движения электрона.

Учитывая, что частицы участвуют в аннигиляции симметричными парами, будем анализировать процессы их взаимодействия **в расчете на один электрон, один мюон и один гама-квант электромагнитной энергии**. Скорость движения мюонов намного меньше скорости исходных электронов. Если скорости движения

исходных электронов близки к скорости света, то возможно образование более тяжелых частиц. В данной статье рассматривается аннигиляция только до образования первых мюонов. Исходные данные по скорости и энергии изложены в статье «Взаимодействие релятивистских электронов с фотонами» [1]. Для расчета аннигиляции используются **средне геометрические значения** скорости и полной энергии электрона на каждом квантовом уровне:

$$E_n = \sqrt{E_{max}E_{min}} = \sqrt{E'_k E_k} \text{ keV} ; \quad (8)$$

$$v_n = \sqrt{v_{max}v_{min}} = \sqrt{v'v} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} ;$$

$$E_{sn} = \frac{m_e c^2}{2} \beta_n^2 \text{ keV} ;$$

$$m_e c^2 = 511.026 \text{ keV} ;$$

$$E_{\gamma n} = 511.026 \text{ keV} + E_{sn} .$$

Индексы *max* и *min* соответствуют нестабильному или метастабильному состоянию электрона в вакууме. Результаты расчетов, до появления первых мюонов, приведены в Табл. 1.

Таблица 1.

<i>n</i>	$v_n \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	$E_n, \text{eV}$	$E_{sn}, \text{eV}$	Продукты аннигиляции, keV
0	1.09385	3.402	3.402	$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_0$ $E_{\gamma 0} = 511.029$
1	1.54694	10.204	6.803	$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_1$ $E_{\gamma 1} = 511.033$
2	2.18771	23.811	13.607	$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_2$ $E_{\gamma 2} = 511.040$
3	3.09543	51.078	27.240	$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_3$ $E_{\gamma 3} = 511.053$
4	4.38099	105.721	54.567	$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_4$ $E_{\gamma 4} = 511.081$
5	6.20232	215.294	109.365	$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_5$ $E_{\gamma 5} = 511.14$
6	8.78349	435.125	219.334	$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_6$ $E_{\gamma 6} = 511.25$
7	12.4426	876.321	440.142	Вариант 1 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_7$ $E_{\gamma 7} = 511.5$ Вариант 2 $E_n > E_{\mu 0}$ $e^+ e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+ \mu^-$
8	17.6314	1 761.876	883.779	Вариант 1 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma_8$ $E_{\gamma 8} = 511.9$ Вариант 2 $E_n > E_{\mu 0}$ $e^+ e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+ \mu^-$

## 6. Скорости мюонов

6.1 Для мюонов двигающихся со скоростью меньше  $10 \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  справедливо соотношение из формулы (4):

$$m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 + \frac{v_\mu^2}{c^2}}} \cong \frac{m_e v_\mu^2}{2}. \quad (9)$$

Энергией Черенкова пренебрегаем,  $E_{he} \ll E_n$ . Формула (4) преобразуется к простому виду:

$$E_\mu = E_n = \frac{m_e c^2}{2} \left( \frac{v_\mu^2}{c^2} \right) \left( \frac{m_\mu}{m_e} + 1 \right). \quad (10)$$

Принимая за основу собственную энергию электрона в кило-электронвольтах, можем записать:

$$E_\mu = E_n = \frac{511.026}{2} \beta_\mu^2 \left( \frac{m_\mu}{m_e} + 1 \right) \text{ keV}.$$

В численном виде, скорость мюона после аннигиляции равна:

$$v_\mu = 1.30113 \sqrt{E_n} \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Ближайшее значение энергии образования мюона,  $E_7 = 0.876321 \text{ keV}$ . Минимальная скорость мюона после аннигиляции:

$$v_{\mu 0} \approx 1.2180 \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Столкновение электронов лобовое, образовавшиеся мюоны разлетаются в противоположных направлениях. Результаты расчета скорости мюонов после аннигиляции электронов приведены в Табл. 2.

Таблица 2

$n$	$E_n, \text{ keV}$	$v_\mu \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	Оценка
7	0.876321	1.2180	достоверная
8	1.761876	1.7270	÷
9	3.538698	2.4476	÷
10	7.098837	3.4667	÷
11	14.147593	4.8940	÷
12	28.317378	6.9238	÷
13	55.941017	9.7318	÷
14	108.822945	13.5732	недостоверная
15	206.787062	18.7104	÷
16	382.190949	25.4367	÷

6.1 На уровне  $n = 13$  надо останавливаться. Дальнейший расчет скорости можно производить только на основании **предполагаемой** формулы энергии мюона:

$$E_{\mu} = E_n = \frac{m_e c^2}{2} \left( \frac{m_{\mu}}{m_e} \right) \beta_{\mu}^2 + m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1+\beta_{\mu}^2}} .$$

Скорость находится методом последовательных приближений. Для начала приближений используют недостоверные результаты предыдущего расчета. Последующая оценка показала:  $v_{\mu 14} = 13.5735$ ;  $v_{\mu 15} = 18.7106$ ;  $v_{\mu 16} = 25.4373$  тысяч километров в секунду. Разница незначительная. **Получить из аннигиляции около-световой мюон невозможно.** Если мюон разогнать до скорости  $v_{\mu} \approx c$ , его максимальная кинетическая энергия равна  $E_{\mu} \approx 52.981 \text{ MeV}$ . Это значительно меньше чем энергии, получаемые по формулам Эйнштейна.

Однако не все так просто, в процесс аннигиляции вмешивается бифуркация образования частиц. На уровнях  $n \geq 8$  могут начать образовываться более тяжелые частицы: пионы; тау-лептоны и даже составной протон. Все зависит от характера окружающей среды (вакуум, газ, вода и т. п.). Например, для протона:

$$E_{p0} > E_{e0} \frac{m_p}{m_e} = 3.402 \cdot 1836 = 6\,246\,072 \text{ eV} ;$$

$$v_p \approx 0.00146 \sqrt{E_n} \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} .$$

Ближайшее значение энергии образования протона,  $E_{10} = 7.098837 \text{ keV}$ . Минимальная скорость протона после аннигиляции:

$$v_{p0} \approx 0.00146 \sqrt{7.098837} \cdot 10^3 = 3.89 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} .$$

**Получить из аннигиляции около-световой протон невозможно.** При скорости разгона  $v_p = 53\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , кинетическая энергия протона примерно равна:

$$E_p \approx \frac{m_e c^2}{2} \left( \frac{m_p}{m_e} \right) \beta_p^2 + m_e c^2 - \frac{m_e c^2}{\sqrt{1+\beta_p^2}} ;$$

$$E_p \approx \frac{511.026}{2} \cdot 1836 \left( \frac{53}{299.792} \right)^2 + 511.026 - \frac{511.026}{\sqrt{1+\left( \frac{53}{299.792} \right)^2}} ;$$

$$E_p \approx 14\,662.14 + 7.803 = 14\,669.943 \text{ keV} = 14.67 \text{ MeV} .$$

Максимальная кинетическая энергия протона, разогнанного до скорости света, приблизительно равна,  $E_{p \text{ max}} \approx 469.27 \text{ MeV}$ .

**На данном моменте статья заканчивается. Тема сложная, выводы неоднозначные. Остается больше вопросов чем ответов.**

## 7. Резюме

В данной статье автор использовал неподвижную лабораторную систему отсчета. В ней существуют собственные часы, собственное время и собственная скорость материальной точки. Специальных выводов не делается. Личная точка зрения автора не обязана совпадать с общепринятыми физическими представлениями об аннигиляции. К сожалению, современный аппарат математической физики прижимает все элементарные частицы вплотную к скорости света, а кинетическую энергию к бесконечности. Перенормировка в квантовой теории поля (КТП) искажает результаты расчетов. Такую ситуацию, в теоретической физике высоких энергий, трудно назвать нормальной.

## Ссылка

1. Халецкий М.Б., Взаимодействие релятивистских электронов с фотонами, 2025/10 <https://halmich.ru/wp-content/uploads/2025/10/%D0%92%D0%B7%D0%B0%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B8%D0%B5-%D1%80%D0%B5%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85-%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2-%D1%81-%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8.pdf>