

## Тема: Релятивистские эффекты

**На уроке рассматриваются понятия:** энергия покоя, полная энергия частиц; связь массы и энергии в специальной теории относительности; релятивистский импульс частицы, релятивистская кинетическая энергия; принцип соответствия.

**Релятивистская механика** - раздел физики, где описывается движение частиц со скоростями близкими к скорости света.

**Закон взаимосвязи энергии и массы** - тело обладает энергией и при нулевой скорости, такую энергию называют **энергией покоя**.

**Релятивистская энергия** составляет сумму собственной энергии частицы и релятивистской кинетической энергии.

**Безмассовыми** называют частицы массы, которых в состоянии покоя равны нулю, они существуют только в движении, при этом во всех инерциальных системах отсчёта их импульс и энергия не равны нулю.

**Массовыми** называют частицы, для которых масса является важной характеристикой, мерой инертности тела.

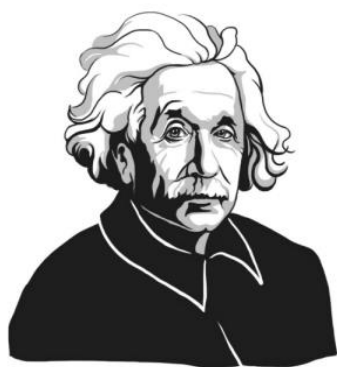
**Принцип соответствия** – это подтверждение законов Ньютона и классических представлений о пространстве и времени, рассматриваются как частный случай релятивистских законов при скоростях намного меньших скорости света.

**Согласно принципу соответствия** любая теория, претендующая на более глубокое описание явлений и на более широкую сферу применимости, должна включать предыдущую теорию, как предельный случай.

«Основы физики претерпели неожиданные и радикальные изменения благодаря смелости молодого и революционно мыслящего гения.»

Вернер Гейзенберг

Эти слова и множество других восхищённых эпитетов будут высказаны в адрес гениального учёного Альберта Эйнштейна. Эйнштейн не боялся опровергать общепринятые утверждения. Он разрушил представление об абсолютном времени и неизменности пространства. Его теория утверждала, что есть движущиеся системы координат со своим относительным временем. А пространство существует, пока в нём существует всё материальное. Время идёт тем медленнее, если быстрее движется тело. Такие удобные и понятные принципы классической физики: о постоянстве массы, длины, времени, скорости - опровергаются следствиями из постулатов специальной теории относительности Эйнштейна.



Альберт (Einstein) Эйнштейн

14 марта 1879 г. – 18 апреля 1955 г.

Физик-теоретик, один из основателей современной теоретической физики, лауреат Нобелевской премии по физике 1921 года, общественный деятель-гуманист.

По законам классической физики: масса – это мера инертности тела. Но Эйнштейн утверждает другое: масса – это мера энергии, содержащейся в теле.

Любое тело обладает энергией уже в силу своего существования. Альбертом Эйнштейном была установлена пропорциональность между энергией и массой:

$$E = mc^2$$

На первый взгляд, простая формула, является фундаментальным законом природы, **законом взаимосвязи энергии и массы.**

Согласно этой формуле тело обладает энергией даже при нулевой скорости, в таком случае энергию называют **Е энергией покоя**. А массу, которая входит в формулу Эйнштейна назовём **m<sub>0</sub> массой покоя**.

Как же будет выглядеть закон взаимосвязи массы и энергии для движущегося тела? К

нему добавляем радикал  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  (релятивистский множитель) из преобразований Лоренца:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Такую формулу называют **релятивистской энергией** или **полной энергией движущегося тела**.

**Релятивистская механика** - раздел физики, где описываются движения тел и частиц со скоростями близкими к скорости света, где используются преобразования Лоренца, перехода из одной инерциальной системы в другую, когда одна система движется относительно другой со скоростью вдоль оси ОХ.

Любые изменения физических величин, связанные с сокращением размеров:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

эффект замедления времени:

$$\Delta t = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

изменение массы тела при изменении энергии:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

закон сложения скоростей:

$$\vartheta = \frac{\vartheta' + v}{1 - \frac{\vartheta' v}{c^2}}$$

в специальной теории относительности называют **релятивистскими изменениями**.

По законам классической физики полная энергия равна сумме кинетической и потенциальной энергий тела или частицы

$$E_{\text{пол}} = E_{\text{к}} + E_0$$

Отсюда выразим кинетическую энергию тела

$$E_{\text{к}} = E_{\text{пол}} - E_0$$

**Релятивистская энергия** составляет сумму собственной энергии частицы и релятивистской кинетической энергии

$$E = mc^2 + E_{\text{к}}$$

В классической физике кинетическая энергия вычисляется по формуле

$$E_{\text{к}} = \frac{m\vartheta^2}{2}$$

Получим ещё одно выражение

$$E \approx mc^2 + \frac{m\vartheta^2}{2}$$

Выразим кинетическую энергию из формулы релятивистской энергии:

$$E_{\text{к}} = E - mc^2$$

Поставим релятивистский радикал  $\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}$ , который можно преобразовать при малых скоростях и получим **релятивистскую кинетическую энергию** частицы:

$$E_{\text{к}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} - m_0 c^2$$

Или другой способ выражения кинетической энергии, если использовать классическую кинетическую энергию, то получим

$$\frac{m\vartheta^2}{2} = E - mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} - mc^2 = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

$$E_k = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

- выражение для определения **релятивистской кинетической энергии**.

Путём не сложных математических вычислений можно доказать, что формула

определения кинетической энергии в классической физике  $E_k = \frac{mv^2}{2}$  и формула кинетической энергии в релятивистской физике равны между собой.

Давайте проверим работают ли главные законы механики - законы Ньютона в релятивистской физике.

Первый закон Ньютона: существуют системы отсчёта, называемые инерциальными, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно, если на него не действуют другие тела.

Первый постулат СТО Эйнштейна: все физические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта, или никакими опытами, проводимыми в инерциальной системе отсчёта, невозможно установить её движение относительно других инерциальных систем.

**Внимание! Они не противоречат друг другу!**

Третий закон Ньютона: силы с которыми тела действуют друг на друга равны по модулю и направлены вдоль одной прямой в противоположные стороны. Этот закон тоже работает в релятивистской физике (смотрите первый постулат СТО).

А что же со вторым законом классической механики? Второй закон Ньютона: ускорение тела прямо пропорционально силе и обратно пропорционально его массе.

$$F = m \cdot a$$

Рассмотрим предельный случай: если на тело долгое время  $t \rightarrow \infty$  (время стремится к бесконечности) действовать с постоянной силой  $F = \text{const}$ , то ускорение будет постоянным  $a = \text{const}$ . Ускорение в свою очередь, зависит от скорости, с которой движется тело:

$$v = v_0 + at$$

Отсюда  $v \rightarrow \infty$  скорость тоже будет стремиться к бесконечности, а это невозможно (смотрите второй постулат СТО), так как скорость тела или частицы не может быть больше предельного значения скорости света ( $v < c$ )!

Но давайте рассмотрим другую формулировку второго закона Ньютона, когда сила прямо пропорциональна изменению импульсов тела ко времени этого изменения:

$$F = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

В классической механике импульс равен произведению массы тела или частицы на его скорость:  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ , где  $m$  – постоянная величина, мера инертности тела.

В релятивистской механике выражение импульса можно записать, используя преобразования Лоренца:

$$p = \frac{mc}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

При скоростях намного меньших, чем скорость света  $v \ll c$ , формула принимает вид классической механики Ньютона

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Эти проявления - подтверждение законов Ньютона и классических представлений о пространстве и времени, рассматривают как частный случай релятивистских законов при скоростях намного меньших скорости света и называют **принципом соответствия**. Согласно **принципу соответствия** любая теория, претендующая на более глубокое описание явлений и на более широкую сферу применимости, должна включать предыдущую теорию, как предельный случай. То есть законы классической механики подтверждаются релятивистской, но только для частиц или тел, движущихся с малыми скоростями. В природе существуют такие частицы (фотоны, мюоны, нейтрино), скорость которых равна или близка к скорости света. Массы таких частиц в состоянии покоя равны нулю, эти частицы называют **безмассовыми**. Они существуют только в движении, но во всех инерциальных системах отсчёта их импульс и энергия не равны нулю. Тогда подтверждается утверждение Эйнштейна, что масса – это мера энергии тела. Частицы, для которых масса является важной характеристикой - мерой инертности, называют **массовыми**.

Найдём соотношение между энергией и импульсом:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$p = \frac{mc}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\frac{E}{p} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{mc}$$

Взаимно уничтожаются подкоренные выражения, сокращается произведение массы на скорость света, и мы получим простое соотношение энергии и импульса, где нет зависимости от массы.

**Энергия и импульс связаны соотношением**

$$E = pc$$

Поэтому во всех инерциальных системах отсчёта импульс и энергия не равны нулю. При превращениях элементарных частиц, обладающих массой покоя  $m \neq 0$ , в частицы у которых  $m = 0$ , их энергия покоя целиком превращается в кинетическую энергию вновь образовавшихся частиц. Этот факт является наиболее очевидным экспериментальным доказательством существования энергии покоя.

Во всех инерциальных системах отсчёта импульс частицы и её энергия связаны соотношением:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

или

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

- эта формула является фундаментальным соотношением энергии и импульса для массовых частиц релятивистской механики. Эти соотношения экспериментально подтверждены.

Следовательно, для безмассовых частиц, где  $m = 0$  или  $m^2 c^4 = 0$ , выражение примет вид

$$E^2 - p^2 c^2 = 0$$

Основное выражение энергии через её импульс записывают так:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

Отсюда, масса, движущейся частицы, будет равна

$$m = \frac{1}{c^2} \sqrt{E^2 - p^2 c^2}$$

Если частица покоится, то её значение можно определить из основной формулы Эйнштейна взаимосвязи массы и энергии:

$$m_0 = \frac{E}{c^2}$$

В обычных условиях, при нагревании тела или его охлаждении, при химической реакции, эти приращения массы происходят, их можно вычислить, но изменения массы не так заметны. Энергию, полученную из расщепления ядер на атомных электростанциях, используют на благо человека, где незначительные массы радиоактивного топлива вырабатывают энергию, питающую электроэнергией огромные города. Но, к сожалению, такую энергию, высвобождающуюся при цепной реакции, люди использовали и военных целях, для уничтожения городов, людей. Поэтому, только в последствии, понимая ответственность за свои открытия, учёные искренне становятся общественными деятелями: правозащитниками и борцами за мир.

### Рассмотрим задачи тренировочного блока урока:

1. Чтобы выработать количество энергии, которой обладает тело массой 1 кг, Красноярской ГЭС потребуется времени \_\_\_\_\_ суток ( $1,5 \cdot 10^7$ ; 173,6; 182,3). Мощность Красноярской ГЭС 6000 МВт.

**Дано:**

$$m = 1 \text{ кг}$$

$$P = 6000 \text{ МВт} = 6 \cdot 10^9 \text{ Вт}$$

t - ? (сутки)

Воспользуемся выражением, описывающим зависимость энергии тела от массы:

$$E = mc^2$$

И зависимостью мощности от работы и времени:

$$P = \frac{A}{t}$$

$$A = E$$

$$t = \frac{A}{P}$$

$$t = \frac{mc^2}{P}$$

$$t = \frac{1 \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2}{6 \cdot 10^9 \text{ Вт}} = 1,5 \cdot 10^7 \text{ сек}$$

Выразим секунды в часах, а затем в сутках:

$$1 \text{ ч} = 3600 \text{ с}$$

$$1 \text{ сут} = 3600 \text{ с} \cdot 24 \text{ ч} = 86400 \text{ с}$$

$$t = \frac{1,5 \cdot 10^7 \text{ сек}}{8,64 \cdot 10^4 \text{ сек}} = 173,6 \text{ суток}$$

**Ответ:** 173,6 суток.

2. Чему равен импульс протона, летящего со скоростью  $8,3 \cdot 10^7$  м/с? На сколько будет допущена ошибка, если пользоваться формулами классической физики? Данные полученных вычислений занесите в таблицу:

Физические величины	Показатели
Масса покоя протона, m	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Скорость света, c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Скорость движения протона, <b>v</b>	$8,3 \cdot 10^7$ м/с
Импульс протона по классическим законам, $p_k$	?
Импульс протона по релятивистским законам, $p_p$	?
Разница в вычислениях импульса протона, $\frac{p_p}{p_k}$	?

Воспользуемся формулами для определения импульса релятивистским и классическим способами:

$$p_p = \frac{mc}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$p_p = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{\sqrt{1 - \frac{8,3^2 \cdot 10^{14}}{3^2 \cdot 10^{16}}}} = \frac{5,01 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\sqrt{1 - \frac{68,89 \cdot 10^{14}}{9 \cdot 10^{16}}}} = \frac{5,01 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\sqrt{1 - 7,65 \cdot 10^{-2}}} = \frac{5,01 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\sqrt{1 - 0,0765}}$$

$$= \frac{5,01 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\sqrt{0,9235}} = \frac{5,01 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,96} = 5,2 \cdot 10^{-19} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

$$\vec{p}_k = m \cdot \vec{v}$$

$$\vec{p}_k = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 8,3 \cdot \frac{10^7 \text{ м}}{\text{с}} = 13,861 \cdot 10^{-20} = 1,38 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

Вычислим разницу показаний:

$$\frac{p_p}{p_k} = \frac{5,2 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-19}} = 3,77 \approx 3,8 \text{ раза}$$

Физические величины	Показатели
Масса покоя протона, m	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Скорость света, c	$3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Скорость движения протона, <b>v</b>	$8,3 \cdot 10^7 \text{ м/с}$
Импульс протона по классическим законам, p <sub>к</sub>	$1,38 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$
Импульс протона по релятивистским законам, p <sub>р</sub>	$5,2 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$
$\frac{p_p}{p_k}$ Разница в вычислениях импульса протона, <b><math>\frac{p_p}{p_k}</math></b>	в 3,8 раза

**Домашняя работа: параграф 63-65, составить таблицу по итогам главы 8**