

Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, как записывается импульс тела массой m :

$$p = mv$$

– импульс равен произведению массы тела на его скорость. Если скорость тела не меняется, то его импульс может измениться только за счет изменения массы:

$$\Delta p = \Delta m v.$$

Здесь Δp – изменение импульса тела при неизменной скорости, Δm – изменение его массы.

Это выражение для потери импульса надо приравнять к выражению (10), которое связывает потерю импульса с потерей энергии. Мы получим формулу

$$\frac{\Delta E}{c^2} v = \Delta m v,$$

или

$$\Delta E = \Delta m c^2,$$

которая означает, что изменение энергии тела влечет за собой пропорциональное изменение его массы. Отсюда легко получить соотношение между полной массой тела и полным запасом энергии:

$$E = m c^2.$$

Открытие этой формулы явилось огромным шагом вперед в понимании природных явлений. Само по себе осознание эквивалентности массы и энергии есть великое достижение. Но полученная формула, помимо того, имеет широчайшее поле применения. Распад и слияние атомных ядер, рождение и распад частиц, превращения элементарных частиц одна в другую и множество других явлений требуют для своего объяснения учета формулы связи между массой и энергией.

В заключение – два домашних задания для любителей теории относительности.

1. Прочитайте статью А.Эйнштейна «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?» (см. с. 7).

2. Попробуйте самостоятельно вывести соотношение $\Delta m = \Delta E/c^2$ для случая системы отсчета, скорость которой v может быть не малой по сравнению со скоростью света c . *Указание.* Используйте точную формулу для импульса частицы:

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

и точную формулу для эффекта Доплера:

$$\omega' = \omega \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}},$$

которая получается, если учесть различие в ходе времени в покоящейся и движущейся системах отсчета.

Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?

А.ЭЙНШТЕЙН

РЕЗУЛЬТАТЫ ... ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИВОДЯТ НАС к очень интересному следствию, вывод которого будет дан в этой статье.

В ... исследовании я исходил, кроме уравнений Максвелла – Герца для пустоты и формулы Максвелла для электромагнитной энергии пространства, еще из следующего принципа.

Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к какой из двух координатных систем, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга, отнесены эти изменения состояния (принцип относительности). Исходя из этого, я, в частности, пришел к следующему результату ...

Пусть система плоских волн света, отнесенная к координатной системе (x, y, z) , обладает энергией l и

пусть направление луча (нормаль к фронту волны) образует угол φ с осью x системы. Если ввести новую координатную систему (ξ, η, ζ) , движущуюся равномерно и прямолинейно относительно системы (x, y, z) , и если начало координат первой системы движется со скоростью v вдоль оси x , то упомянутая энергия света, измеренная в системе (ξ, η, ζ) , будет

$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - (v/V)^2}},$$

где V – скорость света. В дальнейшем мы воспользуемся этим результатом.

Пусть в системе (x, y, z) находится покоящееся тело, энергия которого, отнесенная к системе (x, y, z) , равна



E_0 . Энергия же этого тела, отнесенная к системе (ξ, η, ζ) , движущейся, как выше, со скоростью v , пусть равна H_0 .

Пусть это тело посылает в направлении, составляющем угол φ с осью x , плоскую световую волну с энергией $L/2$ (измеренной относительно системы (x, y, z)) и одновременно посылает такое же количество света в противоположном направлении. При этом тело остается в покое относительно системы (x, y, z) . Для этого процесса должен выполняться закон сохранения энергии и притом (согласно принципу относительности) по отношению к обеим координатным системам. Если мы обозначим через E_1 энергию тела после излучения света при измерении ее относительно системы (x, y, z) и, соответственно, через H_1 энергию относительно системы (ξ, η, ζ) , то, пользуясь полученным выше соотношением, находим

$$E_0 = E_1 + \left(\frac{L}{2} + \frac{L}{2} \right),$$

$$\begin{aligned} H_0 &= H_1 + \left(\frac{L}{2} \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - (v/V)^2}} + \frac{L}{2} \frac{1 + \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - (v/V)^2}} \right) = \\ &= H_1 + \frac{L}{\sqrt{1 - (v/V)^2}}. \end{aligned}$$

Вычитая второе равенство из первого, получаем

$$(H_0 - E_0) - (H_1 - E_1) = L \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/V)^2}} - 1 \right).$$

В этом соотношении обе разности вида $H - E$ имеют простой физический смысл. Величины H и E представ-

ляют собой значения энергии одного и того же тела, отнесенные к двум координатным системам, движущимся относительно друг друга, причем тело покоится в одной из систем (в системе (x, y, z)). Таким образом, ясно, что разность $H - E$ может отличаться от кинетической энергии K тела, взятой относительно другой системы (системы (ξ, η, ζ)), только на некоторую аддитивную постоянную C , которая зависит от выбора произвольных аддитивных постоянных в выражениях для энергий H и E . Следовательно, мы можем положить

$$H_0 - E_0 = K_0 + C,$$

$$H_1 - E_1 = K_1 + C,$$

так как постоянная C при испускании света не изменяется.

Таким образом, получаем

$$K_0 - K_1 = L \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/V)^2}} - 1 \right).$$

Кинетическая энергия тела относительно системы (ξ, η, ζ) уменьшается при испускании света на величину, не зависящую от природы тела. Кроме того, разность $K_0 - K_1$ зависит от скорости точно так же, как кинетическая энергия электрона ...

Пренебрегая величинами четвертого и более высоких порядков, можно получить

$$K_0 - K_1 = \frac{L}{V^2} \frac{v^2}{2}.$$

Из этого уравнения непосредственно следует, что если тело отдает энергию L в виде излучения, то его масса уменьшается на L/V^2 . При этом, очевидно, несущественно, что энергия, взятая у тела, прямо переходит в лучистую энергию излучения, так что мы приходим к более общему выводу.

Масса тела есть мера содержащейся в нем энергии; если энергия изменяется на величину L , то масса меняется, соответственно, на величину $L/(9 \cdot 10^{20})$, причем здесь энергия измеряется в эргах, а масса — в граммах.

Не исключена возможность того, что теорию удастся проверить для веществ, энергия которых меняется в большей степени (например, для солей радия).

Если теория соответствует фактам, то излучение переносит инерцию между излучающими и поглощающими телами.

Поступила 27 сентября 1905 г.