

УДК 530.1

А.Л. Леонтович, доцент, канд. физ.-мат. наук**М.П. Евстигнеев, профессор, д-р физ.-мат. наук***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: max_evstigneev@mail.ru***НЕТРАДИЦИОННОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕМЫ «СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ» В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ВУЗОВ**

В настоящей работе представлено нетрадиционное изложение темы «Основы специальной теории относительности», цель которого заключается в формировании у студентов технических специальностей ВУЗа более правильного понимания сути данной физической теории.

Ключевые слова: специальная теория относительности, эффект Доплера, преобразования Лоренца

Введение.

Тема «Основы специальной теории относительности» является обязательной составляющей программы курса «Общая физика» для студентов технических специальностей ВУЗов. Чтение этой темы, как правило, занимает 1-2 лекции и носит характер обзора основных результатов. Как показывает проведенное нами исследование, лекторы в большинстве случаев используют традиционный подход, изложенный в классических учебниках типа [1] и основанный на выводе преобразований Лоренца из постулатов Эйнштейна и последующего рассмотрения вытекающих из них следствий: относительность одновременности, длительность событий и длина предметов в разных инерциальных системах отсчета, закон сложения скоростей и релятивистская динамика. Изложение этих результатов, как правило, заинтересовывает студентов, поскольку приводят к невероятным, с точки зрения здравого смысла, эффектам, как-то: сокращение предметов, увеличение массы, изменение течения времени в разных системах отсчета и пр. Однако, по сути, все эти релятивистские эффекты не являются физически реальными, поскольку вытекают из невозможности мгновенного получения информации наблюдателем об исследуемом объекте. Следовательно, релятивистские эффекты не есть объективно существующая реальность, а лишь следствие фундаментальной ограниченности самой процедуры их измерения. Вот на этом моменте в традиционном подходе акцента не ставится, что в конечном итоге приводит к неправильному пониманию студентами основ Специальной теории относительности. Целью настоящей работы является нетрадиционное изложение данной темы, исключающее ошибочную трактовку ряда ее следствий.

Результаты.

Физика – наука о наиболее общих свойствах и формах движения материи. Движение(изменение) является способом существования материи. Структура материи реализуется в пространстве (П) и времени (В), в закономерном расположении объектов (тел) вне друг друга, в закономерном следовании явлений друг за другом. Материя немыслима вне определённой координации её частей и процессов, вне времени и вне пространства. В свою очередь П и В неразрывно связаны с материей, являются формами бытия материи. В философии П и В определены следующим образом: **П** – совокупность отношений, выражающих координацию сосуществующих объектов, - их расположение друг относительно друга и относительную величину (расстояние и ориентацию). **В** – совокупность отношений, выражающих координацию сменяющих друг друга состояний (явлений), - их последовательность и длительность.

Физические теории П и В не дают определений П-В-й терминологии в том смысле, что не вводят эту терминологию впервые в употребление через другие термины с известным значением. Они предполагают эту терминологию данной и формулируют методы установления П-В –х отношений предметов для различного рода случаев, в частности, для различно движущихся систем, для удалённых событий, для случаев, когда имеет значение скорость распространения сигналов о событиях и т.д. Для этих целей физические теории осуществляют *экспликацию* П-В-й терминологии [2]. В силу разделения труда, сложившегося в науке, проблемы исследования П-В-х свойств мира стали проблемами физики. Физика развивает соответствующую теорию измерений, учитывающую скорость сигналов о наступлении событий, перемещение событий и наблюдателей, взаимные перемещения событий и т.д.

Уже на уровне здравого смысла является тривиальностью следующее обстоятельство. П и В заключают в себе что-то такое, что мешает рассматривать их как эмпирические вещи, которые можно пощупать, сжать, растянуть, сломать и т.п. П и В не являются эмпирическими объектами. Нельзя отдельно наблюдать эмпирические объекты и их изменения с одной стороны, и П и В – с другой.

Бессмысленно говорить об изменении, возникновении и исчезновении Π и V . Бессмысленно говорить о скорости V и т.п. Однако выражения «*изменение времени*», «*обратный ход времени*» и т.д. прочно вошли в обиход и часто употребляются не только как литературные модификации терминов, обозначающих Π - V -й порядок объектов, Π - V -е интервалы, ряды, структуры и т.п., а буквально. Если, например, высказано утверждение, что Π - V в районе такой-то звезды искривлено, то это утверждение ещё равным счётом ничего не значит, пока не сказано в каком смысле здесь употреблены термины « Π » и « V ». Если он (Π) употреблён в смысле *вместилище* всех вещей, а V – чистая *длительность*, это утверждение бессмысленно, ибо искривлён может быть лишь какой-то ряд предметов относительно другого ряда, а с точки зрения такого понятия Π - V все это исключено. Значит, термин « Π » употреблён здесь в смысле Π – *мир всех, или избранных вещей*, V – *мир всех, или избранных, событий*. Но в таком случае ничего удивительного в этом нет.

Относительно V зададимся вопросом: «Возможна ли такая ситуация, что в одном месте мира V идёт иначе (быстрее, медленнее), чем в другом?» Короче говоря, если космонавт вернулся на Землю через T лет после полёта, то он прожил ровно T лет по земному времени, как бы он ни отсчитывал время в своём корабле. Если он вернулся живым, то абсолютно никакой заслуги физических теорий измерения времени в этом нет. Вопрос о продолжительности жизни ничего общего с вопросом об измерении времени не имеет. И уж наверняка не случится так, что космонавт, вернувшись на Землю, узнает, что его родители ещё не родились.

1. Экспликация пространственно-временных характеристик в физике

Физика старается дать описание, объяснение и предсказание явлений природы, исходя из определённых начальных положений. Причём, описание даётся в трёхмерном пространстве (Π) и во времени (V). Объяснение заключается в формулировании физического закона, применимого к наблюдаемому и изучаемому явлению и в установлении соотношения между причиной и следствием. Оно даётся в рамках теории, способной дать элементы предвидения. Описание и предсказания должны быть количественными; это основной признак точной науки. Но количество выражается и определяется только в результате измерений. Измерение физической величины сводится к сравнению её с другой однородной величиной, точно определённой и условно принятой за единицу (*эталон*) для измерения всех таких же величин. Поэтому для Π - V -х измерений необходимо перейти от философского определения Π и V к конкретно-физическому (измеренческому), т.е. выраженных при помощи определённых физических объектов (линейки, часы и т.п.) и процессов (*экспликация понятий*). Так, основными единицами СИ являются метр (м), секунда (с), килограмм (кг), радиан (рад),стерадиан (стер), ампер (А).

1 м – длина, равная 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p^{10}$ и $5d^3$ атома криптона-86. **1 с** – интервал времени, в течение которого совершается 9192631770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133. **1 кг** – единица массы – представлен массой международного прототипа килограмма.

Измеренные Π - V -е характеристики (длины объектов, длительности событий) и их производные (скорости, ускорения) в различных ИСО, движущихся относительно друг друга, будут отличаться вследствие эффекта Доплера от измеренных в ИСО, условно считающейся неподвижной (собственные значения длины, длительности, скорости и т.п.). Определение кинематических и динамических характеристик различных объектов и событий, заданных в какой-либо ИСО, в других ИСО и составляет основную задачу СТО.

2. Постулаты СТО. Преобразования Пуанкаре – Лоренца

Основу релятивистской механики составляет принцип относительности Пуанкаре-Эйнштейна. В 1904 г. в докладе на Конгрессе искусства и науки в Сент-Луисе Пуанкаре среди основных принципов теоретической физики формулирует принцип относительности, согласно которому, по его словам, «*законы физических явлений должны быть одинаковыми для неподвижного наблюдателя и для наблюдателя, совершающего равномерное поступательное движение, так что мы не имеем и не можем иметь никакого способа определять, находимся ли мы в подобном движении или нет*» [3]. Аналогичное высказывание принадлежит Эйнштейну [4]. Второй фундаментальный принцип физики – *существование конечной максимальной скорости перемещения объекта (передачи информации)*. Кстати, этот принцип о невозможности мгновенных перемещений вытекает из чисто логических соображений – *не может один и тот же объект одновременно находиться в двух пространственно разделённых местах*.

Таким образом, принцип относительности Пуанкаре – Эйнштейна можно сформулировать так: **1.** В любых ИСО все физические явления протекают одинаково (при одинаковых условиях). Иначе: никакие физические эксперименты (механические, тепловые, электромагнитные, ядерные и т.д.), проводимые внутри лаборатории (ИСО), не позволяют установить, находится ли эта лаборатория в покое

или движется равномерно и прямолинейно. Иначе: форма всех физических законов инвариантна для преобразования Пуанкаре–Лоренца (П-Л). 2. Скорость распространения света в вакууме не зависит от движения источника (или приёмника) света и одинакова во всех направлениях. Иначе: скорость света (как и любых безмассовых частиц) в вакууме одинакова во всех ИСО: $c = \text{inv}$ ($c = 2,99792550 \cdot 10^8$ м/с).

Для вывода преобразований Пуанкаре – Лоренца (П-Л) воспользуемся методом **к** – коэффициентов (фактически – эффектом Доплера) [5].

Будем считать, что наблюдатели во всех ИСО имеют одинаковый набор часов. Такие часы предоставлены самой природой. Частоты спектральных линий тождественных атомов (например, атомов цезия-133) всегда одни и те же во всех ИСО, и их можно использовать в качестве устройства для отсчёта времени. Синхронизация таких часов осуществляется путём обмена радио- или световыми импульсами. Для измерения расстояний используется радиолокационный (лазерный) метод. Всё, что здесь необходимо, – это фиксировать моменты посылки и приёма сигналов при помощи соответствующих радиотехнических устройств.

Основная идея метода – рассмотрение одномерной совокупности инерциальных наблюдателей, движущихся равномерно вдоль некоторой прямой (например, луча света) – оси x .

Рассмотрим ИСО1, условно считаемую неподвижной, относительно которой движется ИСО2 со скоростью v (в единицах скорости света $\beta = v/c$) вдоль линии их соединяющей. Можно считать неподвижной ИСО2, тогда ИСО1 движется относительно ИСО2 с той же скоростью, но в противоположном направлении. В момент, когда они находятся рядом, происходит синхронизация их часов. Обмен сигналами происходит систематически, так что положения ИСО друг относительно друга известны.

Введем обозначения: $t_1 - t_0 = \Delta t$ – промежуток времени между моментом синхронизации часов t_0 и моментом посылки сигнала в момент времени t_1 наблюдателем ИСО1; $t'_1 - t'_0 = \Delta t'$ – промежуток времени между приёмами этих сигналов наблюдателем в ИСО2; t_2 – момент приёма отражённого сигнала наблюдателем в ИСО1. Тогда $\Delta t' = k \Delta t$, а $t_2 - t_0 = k \Delta t'$. Для инерциальных наблюдателей коэффициент k не меняется со временем и не зависит от величины Δt . То обстоятельство, что фактор k одинаков при посылке сигналов от ИСО1 к ИСО2 и от ИСО2 к ИСО1, вытекает непосредственно из принципа относительности. Нетрудно видеть, что он определяется только относительной скоростью ИСО. Найдем $k = f(v)$.

Время, за которое сигнал прошёл расстояние от ИСО1 до ИСО2 и обратно, будет $(t_2 - t_1)/2$, а расстояние между ними будет $c(t_2 - t_1)/2 = c/2 [(t_2 - t_0) - (t_1 - t_0)] = c/2 (k\Delta t' - 1) = c/2 (k^2 - 1)\Delta t$. Это же расстояние наблюдатель 2 преодолел со скоростью v за время $(t_1 - t_0) + 1/2 (t_2 - t_1) = 1/2(k^2 + 1)\Delta t$. Сравнивая пути $c/2 (k^2 - 1)\Delta t = v/2 (k^2 + 1)\Delta t$, получаем $v/c = \beta = (k^2 - 1) / (k^2 + 1)$, откуда фактор k будет

равен: $k = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$. Найденный коэффициент выражает релятивистский эффект Доплера. Физически это

означает, что идентичные синхронизированные часы показывают одинаковое время во всех ИСО (принцип относительности). Однако, если спектр излучения цезия-133 посылают из ИСО2 (T_0), а принимают в ИСО1 (T), то спектры собственный и принятый, вследствие эффекта Доплера, смещены в отношении k : $T = k T_0$, $\lambda = cT = c k T_0 = k \lambda_0$: при взаимном удалении – в длинноволновую часть спектра, а при сближении – в коротковолновую, причём $k = \lambda / \lambda_0$ не зависит от частоты (длины волны в вакууме) и применим ко всем спектральным линиям излучения. Отсюда следует, что координаты x и время t подчиняются таким же соотношениям: $x = k x_0$ и $t = k t_0$.

Используя эффект Доплера (метод k - коэффициентов), можно получить все основные следствия из принципа относительности П-Э, не прибегая к преобразованиям П-Л. Однако при решении многих физических задач более привычен и удобен, особенно в динамике, способ, основанный на координатном или векторном представлении физических величин. Поэтому, чтобы показать эквивалентность этих двух методов, получим преобразования П-Л, используя метод коэффициента k (эффект Доплера), а из них уже получим необходимые следствия.

Обозначим, по традиции, ИСО1 буквой **K**, а движущуюся ИСО2 – **K'**; соответственно координаты и время x, t и x', t' . Обмен информацией между ними осуществляется световыми или радио – импульсами, так что $t = x/c$, $t' = x'/c$. Тогда имеем:

$$x = k x' = x' \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \cdot \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} = x'(1 + \beta) / \sqrt{1-\beta^2} = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

аналогично для времени:

$$t = k t' = t' \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \times \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} = t' \frac{1+\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} = (t' + v/c x') / \sqrt{1-\beta^2}.$$

В декартовой системе координат при движении K' со скоростью v относительно K вдоль оси x преобразования П-Л имеют вид: $x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1-\beta^2}}$, $y = y'$, $z = z'$, $t = [t' + (v/c^2)x']/\sqrt{1-\beta^2}$. При обратных преобразованиях в K' перед скоростью v нужно поменять знак. Учитывая, что ИСО не обязательно движутся друг по отношению к другу вдоль одной оси, запишем их в векторной форме:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}' + (\mathbf{r}', \mathbf{v})\mathbf{v}/v^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) + \mathbf{v}t'/\sqrt{1-\beta^2} \quad \text{и} \quad t = [t' + (\mathbf{r}', \mathbf{v})\mathbf{v}/c^2]/\sqrt{1-\beta^2}.$$

3. Интервал между событиями и его инвариантность

Четырёхмерным П называют воображаемое П 4-х измерений, на осях которого откладываются 3 координаты x , y , z и время t . Любое событие изображается точкой в 4-мерном ПВ (мировая точка). Движению некоторой частицы в ПВ соответствует мировая линия.

Если x_1, y_1, z_1, t_1 и x_2, y_2, z_2, t_2 – координаты событий 1 и 2 в 4-мерном ПВ, то величину S_{12} , равную $S_{12} = \sqrt{[c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2]}$ называют интервалом между двумя событиями. Интервал между двумя бесконечно близкими событиями $dS = \sqrt{(c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2)} = \sqrt{(c^2 - dl^2)}$. Путем преобразований П-Л легко показать, что $(ct)^2 - x^2 = (ct')^2 - (x')^2$, т.е. $S_{12}^2 = \text{inv}$ – инвариант.

Понятие интервала позволяет изучать ПВ-е соотношения между событиями, устанавливать причинно-следственные связи между ними. Причинно-следственная связь возможна лишь между событиями, разделёнными вещественными интервалами ($ct > l$ и $S_{12}^2 = c^2 t^2 - l^2 > 0$). Такие интервалы называют *временеподобными*. Мнимые интервалы ($ct < l$ и $S_{12}^2 < 0$) называют *пространственноподобными*.

4. Релятивистский закон сложения скоростей

Пусть ИСО2 движется относительно ИСО1 со скоростью V . В ИСО2 в том же направлении движется материальная точка со скоростью v' . С какой скоростью v движется м.т. относительно ИСО1? Из преобразований П-Л имеем:

$$dx/dt = (dx' + V dt') / (dt' + V/c^2 dx') = (dx' / dt' + V) / (1 + V/c^2 dx' / dt'),$$

и окончательно имеем:

$$v = (v' + V) / (1 + Vv' / c^2).$$

Векторную форму закона сложения скоростей получим из $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$:

$$\mathbf{v} = [\mathbf{V} + \mathbf{v}' \sqrt{1 - \beta^2} + 1/V^2 (1 - \sqrt{1 - \beta^2}) (\mathbf{v}', \mathbf{V}) \mathbf{V}] / [1 + (\mathbf{v}', \mathbf{V}) / c^2].$$

Формула перехода от $\mathbf{v}$ к $\mathbf{v}'$ отличается от приведенной знаком при $\mathbf{V}$.

5. 4 – мерное представление кинематики и динамики СТО

Математические операции в ПВ значительно облегчаются, если ввести переменные: $x = x_1$, $y = x_2$, $z = x_3$, $ict = x_4$, $i = \sqrt{-1}$. Тогда мировая точка будет представлена четырьмя координатами: x_1, x_2, x_3, x_4 , из которых одна, соответствующая времени, является мнимой. Чтобы короче была запись, пользуются обозначением координат мировой точки в виде x_i , где $i = 1, 2, 3, 4$. Подобно тому, как в 3-мерном пространстве положение частицы относительно системы отсчёта определяется 3-мерным вектором, так в ПВ пользуются *четырёхмерным вектором* (4-вектор $\mathbf{x}$, 4-вектор скорости $\mathbf{u}$, 4-вектор ускорения $\mathbf{w}$, 4-вектор импульса $\mathbf{p}$, 4-вектор электромагнитного потенциала $\mathbf{A}$ и т.д.). Важно отметить, что все 4-векторы образуют группу Пуанкаре – Лоренца (ГПЛ), и форма их преобразований одинакова в ПВ. Например,

$$x_1 = (x'_1 - i v/c x'_4) / \sqrt{1-\beta^2}, \quad x_2 = x'_2, \quad x_3 = x'_3, \quad x_4 = (x'_4 + i v/c x'_1) / \sqrt{1-\beta^2}.$$

Аналогично

$$A_1 = (A'_1 - i v/c A'_4) / \sqrt{1-\beta^2}, \quad A_2 = A'_2, \quad A_3 = A'_3, \quad A_4 = (A'_4 + i v/c A'_1).$$

При помощи этих формул легко показать, что в ПВ квадрат 4-вектора и скалярное произведение являются инвариантами, т.е. $A_i^2 = A'^2_i$, $A_i B_i = A'_i B'_i$, где $i = 1, 2, 3, 4$. Из этих формул следует, что пространственные и временные компоненты квадрата 4-вектора относительноны, они зависят от выбора ИСО.

6. Скорость мировой точки

Подобно тому, как в трехмерном пространстве механика определяет скорость производной радиус-вектора $\vec{r}$ по времени t , так в ПВ скорость мировой точки может быть определена

дифференцированием по собственному времени τ 4-вектора $\vec{x} = \vec{e}_i x_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$), т.е. 4-вектор скорости можно записать в виде: $\vec{u} = \frac{d\vec{x}}{d\tau} = \vec{e}_i \frac{dx_i}{d\tau}$, или в проекциях на оси координат ПВ: $u_i = dx_i / d\tau$. Подставляя $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z, x_4 = ict$ и $d\tau = dt\sqrt{1-\beta^2}$, имеем:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{dx_1}{d\tau} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{dx}{dt} = \frac{v_x}{\sqrt{1-\beta^2}} ; \\ u_2 &= \frac{dx_2}{d\tau} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{dy}{dt} = \frac{v_y}{\sqrt{1-\beta^2}} ; \\ u_3 &= \frac{dx_3}{d\tau} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{dz}{dt} = \frac{v_z}{\sqrt{1-\beta^2}} ; \\ u_4 &= \frac{dx_4}{d\tau} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{d(ict)}{dt} = \frac{ic}{\sqrt{1-\beta^2}} , \end{aligned}$$

где v_x, v_y, v_z есть проекции скорости $\vec{v} = \dot{\vec{r}}$ на декартовы оси координат. Четвертая компонента 4-вектора u_i берется на ось времени.

Первые три равенства запишем в векторной форме:

$$(u_1, u_2, u_3) = \frac{\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} .$$

Находя u_i^2 , можно показать, что

$$u_i^2 = -c^2 \text{ и } u_i'^2 = -c^2 \text{ откуда } u_i^2 = inv .$$

Отметим, что 4-вектор является времениподобным вектором.

7. Ускорение мировой точки

Ускорение мировой точки определяется равенством: $w_i = du_i / d\tau$. В векторной форме имеем:

$$(w_1, w_2, w_3) = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \frac{d}{dt} \frac{\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\dot{\vec{v}}}{\sqrt{1-\beta^2}} + \frac{\vec{v}(\vec{v}, \dot{\vec{v}})}{(1-\beta^2)c^2} , \quad w_4 = \frac{i}{c} \frac{(\vec{v}, \dot{\vec{v}})}{c(1-\beta^2)^2} .$$

Возводя эти два выражения в квадрат и складывая, получим:

$$w_i^2 = \frac{\dot{v}^2 - \frac{1}{c^2} [\vec{v}, \dot{\vec{v}}]^2}{(1-\beta^2)^3} > 0 ,$$

откуда следует, что 4-вектор ускорения – пространственноподобный. Дифференцируя $u_i^2 = inv$ по τ , получим $u_i w_i = 0$, откуда следует, что 4-векторы u_i и w_i взаимноперпендикулярны.

8. 4-вектор импульса свободной частицы

4-вектор импульса p_i получим, умножая массу частицы (тела) m на 4-вектор скорости u_i . Учитывая, что $u_i^2 = -c^2 = inv$ и $p_i^2 = -mc^2 = inv$, получаем, что масса m – скаляр, не зависящий от выбора системы отсчёта (не зависит от скорости). Это же утверждение можно получить непосредственно из преобразований П-Л для компонентов p_i :

$$p_1 = \frac{p_1' - i \frac{v}{c} p_4'}{\sqrt{1-\beta^2}} ; p_2 = p_2' ; p_3 = p_3' ; p_4 = \frac{p_4' + i \frac{v}{c} p_1'}{\sqrt{1-\beta^2}} .$$

Подстановка компонентов p_i в p_i^2 даёт:

$$p_i^2 = -m^2 c^2 , i = 1, 2, 3, 4 .$$

9. Кинетическая и полная энергии свободно движущегося тела

Пусть под действием силы, приложенной в направлении движения тела, тело начинает двигаться.

При этом будет совершаться работа $dA = \vec{F}_i \cdot d\vec{r}$. Здесь $\vec{F}_i = m w_i$, $w_i = \frac{\dot{\vec{v}}}{(1-\beta^2)^{3/2}}$, т.к. $\vec{v} \uparrow \vec{a}$, а $d\vec{r} = \vec{v} dt$.

Окончательно имеем:

$$dA = (m \, dv / dt) \cdot v \, dt / (1 - \beta^2)^{3/2}, \text{ или } dA/mc^2 = (\beta \, d\beta) / (1 - \beta^2)^{3/2}.$$

Интегрирование даёт:

$$A/mc^2 = \int_0^\beta \frac{\beta \, d\beta}{(1 - \beta^2)^{3/2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1.$$

Работа идет на сообщение телу кинетической энергии $E_k = m \, c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$. Далее $E_k + mc^2 =$

$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = E$ – полная энергия свободно движущегося тела. Если тело покоится $\beta = 0$, то энергия покоя

$$E_0 = mc^2. \text{ В движении } E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

10. Функция Гамильтона свободно движущегося тела

Функция Гамильтона H выражает энергию тела E , выраженную через импульс тела $\mathbf{p}$. Связь между $\mathbf{p}$ и E найдём, преобразовав временную компоненту 4-вектора импульса. Это тот случай, когда тело покоится в системе K' :

$$p_4 = \frac{imc}{\sqrt{1 - \beta^2}} = i \frac{E}{c}.$$

Теперь запишем p_i^2 в виде:

$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 = -m^2 c^2$,
где $p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 = \mathbf{p}^2$, а $p_4^2 = -E^2 / c^2$, или $E^2 = c^2 \mathbf{p}^2 + m^2 c^4$, откуда релятивистская функция Гамильтона для свободной частицы $H = \sqrt{(c^2 \mathbf{p}^2 + m^2 c^4)}$ – уравнение Дирака. Для покоящейся частицы $E_0 = \pm mc^2$. Положительные значения энергии покоя относятся к *частице*, а отрицательные – к *античастице*.

Для фотона

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

где $E = h\nu$, $p = h\nu/c$. Подставляя E и p в формулу Дирака, имеем:

$$(h\nu)^2 = (h\nu / c)^2 c^2 + m^2 c^4,$$

откуда $m_{\text{фотона}} = 0$. Фотон – *безмассовая частица*.

Заключение.

Основные выводы, которые должны быть сделаны на основании приведенного анализа следующие:

1. Экспериментальное основание СТО – релятивистский эффект Доплера.
2. 4-векторы ПВ образуют группу Пуанкаре – Лоренца и преобразуются одинаково.
3. Масса тела (частицы) не зависит от его скорости относительно ИСО, в которой находится «наблюдатель».
4. Фотон – безмассовая частица ($m_{\text{ф}} = 0$).

Приведенный здесь подход к изложению темы «Специальная теория относительности» может быть использован лекторами как альтернатива традиционному подходу, дающий основание для формирования правильного понимания сути этой физической теории.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1 / И.В. Савельев. — М.: Наука, 1982. — 432 с.
2. Зиновьев А.А. Логика науки / А.А. Зиновьев. — М.: Мысль, 1971. — 279 с.
3. Poincare H. L'etat actuel et l'avenir de la Physique mathematique / H. Poincare // Bulletin des Sciences Mathematiques. — 1904. — V. 28. — P. 302–324.
4. Einstein A. Zur Elektrodynamik der bewegter Körper / A. Einstein // Ann. Phys. — 1905. — V. 17. — P. 891–921.
5. Бонди Г. Гипотезы и мифы в физической теории / Г. Бонди. — М.: Мир, 1972. — 321 с.

Поступила в редакцию 16.04.2009 г.