Специальная теория относительности

Гринберг Я. С.

26 октября 2011 г.

1. Историческое введение

В самом конце XIX в., 27 апреля 1900 г., выдающийся английский физик Уильям Томпсон (лорд Кельвин) прочел ставшую знаменитой лекцию в Королевском институте, озаглавленную "Тучи девятнадцатого века над динамической теорией теплоты и света". Смысл его выступления сводился к тому, что здание физики в основном построено и остается только разобраться с двумя проблемами, появившимися на горизонте. Это отрицательный результат опытов Майкельсона-Морли по определению скорости Земли относительно эфира и спектр излучения абсолютно черного тела, не поддававшийся никакому рациональному объяснению. Впрочем, судя по содержанию лекции, сам Томпсон не считал эти проблемы серьезными, и, по-видимому полагал, что они будут тем или иным способом разрешены в рамках классической физики. Однако, Томпсон ошибся. Объяснение упомянутых выше двух проблем привело к перевороту в естествознании с далеко идущими последствиями. Решение первой проблемы привело к появлению специальной теории относительности (СТО), а решение второй- к созданию квантовой механики.

Эта лекция посвящена СТО, поэтому вначале поучительно рассмотреть тот исторический фон, на котором возникла эта теория. В XIX веке в физике господствовала концепция эфира. Эфиром называлась некая субстанция, которой заполнена вся Вселенная. Все физические тела погружены в эфир, который сам является неподвижным. Многие физические процессы, такие, например, как распространение света, объяснялись свойствами эфира. Собственно говоря, понятие эфира и возникло для того, чтобы объяснить волновые свойства света- интерференцию и дифракцию. В то время считалось, что подобно тому как звуковые волны требуют для своего распространения среды-воздуха, точно также и световые волны должны распространяться в некоторой среде. Эту среду и назвали эфиром. Свойства этой среды были довольно странными: она была без цвета и запаха, все физические тела двигались сквозь нее, не испытывая никакого видимого сопротивления. Поскольку эта среда считалась неподвижной, то встал вопрос о том как измерить скорость физического тела относительно этой неподвижной среды. Здесь уместна аналогия со звуковой волной. Представьте, что вы едете в вагоне поезда со скоростью V и хотите определить с помощью звука скорость вашего поезда. Предположим, что окна вагона широко открыты, так что вагон движется сквозь воздух, не увлекая его, то есть воздух остается неподвижным. Пусть длина вагона L. Поместим в центре вагона источник звуковых волн, а на передней и задней его стенках поместим приемники. Пусть в момент времени t_0

источник испускает звуковую волну. Поскольку скорость звуковой волны не зависит от скорости источника, а определяется только свойствами среды (в данном случае- воздуха), то эта звуковая волна дойдет до приемника на передней стенке через время $t_1 = L/2(u - V)$, где u- скорость звука, а до задней стенки через время $t_2 = L/(u + V)$. Измерив разность времен $\Delta t = t_1 - t_2 = LV/(u^2 - V^2)$, мы можем, зная скорость звука u, определить скорость вагона V. Обратите внимание, что этот результат (Δt) будет один и тот же как с точки зрения наблюдателя, сидящего в вагоне поезда, так и с точки зрения наблюдателя стоящего на платформе на земле. Собственно, эта простая аналогия со звуком и легла в основу интерференционных экспериментов Майкельсона и Морли. В качестве вагона использовалась Земля, а в качестве источника волн- свет. Здесь нет возможности детально разобрать этот эксперимент, поскольку он относится к разделу оптики. Скажем только, что все попытки обнаружить разность времени для света, распространяющегося по ходу движения Земли по орбите вокруг Солнца (скорость Земли на солнечной орбите составляет примерно 30 км/с) и для света, распространяющегося против движения Земли, оказались безуспешными. Ведущими учеными того времени (прежде всего, Пуанкаре и Лоренцем) были предприняты выдающиеся усилия, чтобы спасти теорию эфира. Основная их идея состояла в том, что при движении сквозь эфир тела приобретают такие свойства, что никакие оптические эксперименты не позволяют обнаружить это движение. Эти свойства описывались некими преобразованиями, впоследствии получившими название преобразований Лоренца и оказавшихся в результате правильными, но их физический смысл был совершенно не понятен.

Решающий шаг для объяснения отрицательного результата интерференционных экспериментов Майкельсона был сделан Эйнштейном. В статье, появившейся в 1905 г. в немецком журнале Annalen der Physik, под названием "К электродинамике движущегося тела"им были сформулированы основные постулаты новой теории, получившей название "специальная теория относительности".

2. Постулаты Эйнштейна

Первый постулат состоит в том, что никакого эфира не существует. Поскольку эфир являлся выделенной системой, так как был неподвижным относительно любых тел, то его упразднение логично приводит к тому, что выделенных систем не существует и поэтому все инерциальные системы отсчета физически эквивалентны, то есть, невозможно никакими экспериментами, ни оптическими, ни механическими определить движетесь ли вы или стоите на месте. Это так называемый принцип относительности. **Во всех инерциальных системах все физические законы одинаковы.**

Второй постулат состоит в том, что **скорость света не зависит от скорости источника и одинакова во всех инерциальных системах.** Впрочем, независимость скорости света от скорости источника подразумевалась и в теории эфира (вспомним, что скорость звука также не зависит от скорости источника). Однако в теории Эйнштейна этот постулат имеет самостоятельное значение, поскольку никакой среды для распространения света не существует.

Рассмотрим теперь одно важное следствие этих двух постулатов. Пусть в центре уже рассмотренного вагона помещен источник света, а на передней и задней стенках вагона установлены приемники светового излучения. Проведем тот же самый эксперимент,

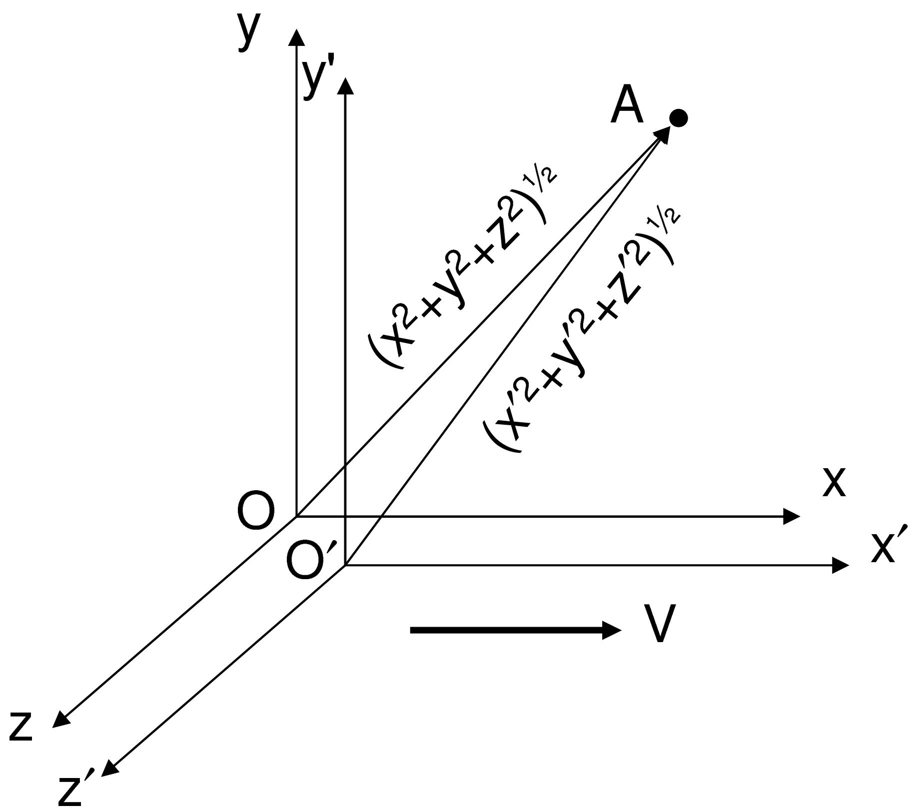

Рис. 1: Координатная система

что и со звуком: в некоторый момент времени t_0 (один и тот же для наблюдателя в вагоне и для наблюдателя, стоящего на платформе) включается источник и каждый наблюдатель измеряет по своим часам разность времени Δt достижения светом приемников на противоположных сторонах вагона. Согласно первому постулату для наблюдателя, сидящего в вагоне, свет дойдет до обеих приемников одновременно ($\Delta t = 0$). В противном случае по разности времен наблюдатель в вагоне мог бы определить скорость своей инерциальной системы, что запрещено первым постулатом. Для наблюдателя, стоящего на платформе, величина Δt будет отлична от нуля: поскольку, согласно второму постулату, скорость света не зависит от скорости источника, то до задней стенки вагона свет дойдет быстрее, чем до передней. Таким образом, одним из следствий двух постулатов Эйнштейна является тот факт, что временной интервал между двумя событиями в одной инерциальной системе может не совпадать с интервалом времени между теми же событиями в другой инерциальной системе. То есть, в разных инерциальных системах время течет неодинаково!

3. Преобразования Лоренца

Рассмотрим две прямоугольных системы координат S и S', оси которых параллельны друг другу. Систему S, относительно которой точка A с координатами x_A, y_A, z_A

является неподвижной будем называть лабораторной системой координат. Система S' движется относительно системы S с постоянной скоростью V вдоль оси x. В этой системе координаты y'_A и z'_A остаются теми же, что и координаты этой точкм в системе S ($x'_A = x_A$, $y'_A = y_A$), а координата x' точки A меняется. До Эйнштейна считалось, что x' подчиняется преобразованию Галилея $x' = x - Vt$, однако постулаты Эйнштейна приводят к совсем другим соотношениям.

Пусть в момент времени, когда начала обеих координатных систем совпадали, в этой точке (начале координат двух систем) вспыхнул источник света. Согласно второму постулату этот свет будет распространяться с одной и той же скоростью c в обеих системах. С точки зрения наблюдателя в лабораторной системе этот свет дойдет до точки A за время

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{c}$$

а с точки зрения наблюдателя в системе S' свет дойдет до точки A за время

$$t' = \frac{\sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}}{c}$$

Из этих выражений следует, что между координатами и временем в каждой системе существует одинаковое соотношение

$$c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0; \text{и } c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = 0$$

Другими словами, можно сказать, что величина $c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$ одна и та же в любой координатной системе:

$$c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 \tag{1}$$

В теории относительности эта величина называется *интервалом* между двумя событиями (или просто, интервалом) и обозначается буквой s: $s^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$. Здесь имеется ввиду два события, одно из которых произошло в системе S в точке $x = 0, y = 0, z = 0$ в момент времени $t = 0$ и другое событие, которое произошло в этой же системе в точке x, y, z в момент t. В любой другой инерциальной системе S' первое событие происходит в точке $x' = 0, y' = 0, z' = 0$ в момент времени $t' = 0$ а второе событие в точке x', y', z' в момент t'. Тем не менее, в соответствии с (1) $s^2 = s'^2$. Если эти два события соответствуют тому, что первое из них является вспышкой света в точке $x = 0, y = 0, z = 0$ в момент времени $t = 0$, а второе приходу этого света в точку x, y, z в момент t, то, как мы видели выше, для этих двух событий интервал равен нулю во всех инерциальных системах, $s = s' = 0$.

Величины, которые не изменяются при переходе из одной инерциальной системы в другую называются *инвариантами*. Таким образом, интервал s является инвариантом.

Далее, мы хотим найти такие линейные соотношения между координатами в S' и S, чтобы велична интервала s при этих преобразованиях не менялась. Для координатных систем, которые движутся относительно друга друга вдоль оси x, как показано на Рис. 1, $y' = y, z' = z$ и равенство интервалов $s' = s$ запишется в виде

$$c^2t^2 - x^2 = c^2t'^2 - x'^2 \tag{2}$$

В наиболее общем виде линейную связь между x', t' и x, t, которая оставляет инвариантной величину $c^2t^2 - x^2$, можно записать в следующем виде:

$$x' = a_1x + b_1t; \;\; t' = a_2x + b_2t. \tag{3}$$

Коэффициенты a_1, b_1, a_2, b_2 находятся подстановкой (3) в правую часть (2). В результате получим

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{4}$$

$$t' = \frac{t - xV/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{5}$$

где $\beta = V/c$.

Преобразования обратные этим получаются заменой штрихованных переменных на не штрихованные и наоборот и заменой знака у скорости:

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{6}$$

$$t = \frac{t' + x'V/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{7}$$

Формулы (4), (5), (6), (7) называются преобразованиями Лоренца по имени выдающегося нидерландского физика Х. А. Лоренца (1853-1928), который, пытаясь объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона, обнаружил, что эти преобразования оставляют инвариантными уравнения Максвелла, описывающие электромагнитное поле. Вследствие этого никакими оптическими измерениями обнаружить эфирный ветер невозможно. Однако, в рамках эфирной теории трактовка этих преобразований оставалась весьма туманной. Особенно это касалось преобразования времени (5). И только с появлением специальной теории относительности Эйнштейна эти преобразования получили современную трактовку.

Введем далее понятия пространственного и временного расстояний. Пусть в системе S имеются две точки А и В с координатами x_A, y_A, z_A, t_A и x_B, y_B, z_B, t_B. В системе S' этим координатам соответствуют

$$x'_A = \frac{x_A - Vt_A}{\sqrt{1-\beta^2}}; \;\; y'_A = y_A; \;\; z'_A = z_A; \;\; t'_A = \frac{t_A - x_AV/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{8}$$

$$x'_B = \frac{x_B - Vt_B}{\sqrt{1-\beta^2}}; \;\; y'_B = y_B; \;\; z'_B = z_B; \;\; t'_B = \frac{t_B - x_BV/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{9}$$

Определим в системе S пространственное расстояние как $\Delta x = x_A - x_B$, $\Delta y = y_A - y_B$, $\Delta z = z_A - z_B$, и временное расстояние как $\Delta t = t_A - t_B$. И аналогично в системе S': пространственное расстояние $\Delta x' = x'_A - x'_B$, $\Delta y' = y'_A - y'_B$, $\Delta z' = z'_A - z'_B$, и временное расстояние $\Delta t' = t'_A - t'_B$. Нетрудно убедиться, что эти величины также подчиняются преобразованиям Лоренца

$$\Delta x' = \frac{\Delta x - V\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}}; \;\; \Delta y' = \Delta y; \;\; \Delta z' = \Delta z; \;\; \Delta t' = \frac{\Delta t - \Delta xV/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{10}$$

$$\Delta x = \frac{\Delta x' + V\Delta t'}{\sqrt{1-\beta^2}};\ \ \Delta y = \Delta y';\ \ \Delta z = \Delta z';\ \ \Delta t = \frac{\Delta t' + \Delta x' V/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{11}$$

Нетрудно убедиться, что интервал

$$s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2} \tag{12}$$

является инвариантом преобразований Лоренца (10), (11), то есть, эта величина остается постоянной во всех инерциальных системах отсчета

$$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + \Delta t^2} = \sqrt{\Delta x'^2 + \Delta y'^2 + \Delta z'^2 - c^2 \Delta t^2} \tag{13}$$

3.1. Следствия из преобразований Лоренца

1. Пусть два события происходят в S системе в одной точке ($\Delta x = 0$) и в один момент времени ($\Delta t = 0$). Тогда, согласно (10) в системе S' эти события происходят также в одной точке и одновременно: $\Delta x' = 0, \Delta t' = 0$.

2. Пусть два события происходят в S системе в одной точке ($\Delta x = 0$), но с интервалом времени ($\Delta t \neq 0$). Тогда согласно (10) в S' системе

$$\Delta x' = \frac{-V\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}};\ \ \Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}} > \Delta t \tag{14}$$

Таким образом, в системе S' эти события происходят в разных точках, и временное расстояние между ними увеличивается. Это означает что в S' системе время течет медленнее.

3. Пусть в S системе два события происходят в разных точках ($\Delta x \neq 0$), но в один и тот же момент времени ($\Delta t = 0$). Тогда в S' системе

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\sqrt{1-\beta^2}} > \Delta x; \quad \Delta t' = \frac{-\Delta x V/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{15}$$

Таким образом, пространственное расстояние между событиями в S' возрастает, а временное расстояние между ними становится отрицательным, то есть, событие в точке B происходит позднее события в точке A.

4. *Принцип причинности.* Пусть в S системе два события происходят в разных точках ($\Delta x \neq 0$) с интервалом времени ($\Delta t \neq 0$). И пусть $t_B > t_A$, то есть событие в точке B произошло позже события в A. Тогда эти два события могут быть связаны между собой, то есть, между ними может быть причинно-следственная связь. Например, находясь в точке A вы в момент t_A стреляете в мишень, которая находится в точке B, и пуля поражает мишень в момент t_B. Для того, чтобы между двумя событиями существовала причинно-следственная связь, необходимо выполнение условия

$$x_A - x_B < c(t_B - t_A) \tag{16}$$

То есть, расстояние между точками A и B должно быть меньше расстояния, которое свет проходит за время $t_B - t_A$. Раньше, чем свет дойдет из A в B никакое событие, которое случится в B не может иметь своей причиной событие в A. Таким образом, условие (16) является необходимым для того, чтобы два события в A и в B были между собой связаны причиной и следствием. Посмотрим теперь, что происходит с временным интервалом между этими событиями в другой инерциальной системе. Перепишем $\Delta t'$ в (10) в следующем виде:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t \left(1 - \frac{V}{c}\frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{17}$$

Если между событиями может существовать причинно-следственная связь, то в (17) $\Delta x/c\Delta t < 1$ и, поскольку $V < c$, то при этом всегда $\Delta t' > 0$. Таким образом, если в S системе два события могут быть связаны причиной и следствием, то в любой другой инерциальной системе $\Delta t' > 0$, то есть, событие в точке B происходит после события в точке A. Если же события в A и B никак не связаны, то величина $\Delta x/c\Delta t$ может быть больше единицы и в этом случае $\Delta t'$ может иметь любой знак.

5. *Длина отрезка.* В любой инерциальной системе *длиной отрезка* называется пространственный интервал между двумя точками, измеренный в один и тот же момент времени по часам этой системы. Пусть в системе S имеется отрезок длиной $\Delta x = l_0$, который относительно этой системы покоится. В этом случае величина l_0 называется собственной длиной отрезка. Чтобы определить длину этого отрезка в S' системе, надо измерить координаты концов этого отрезка в один и тот же момент времени по часам системы S', то есть, при $\Delta t' = 0$. Из выражения для Δx в (11) получим

$$\Delta x = \frac{\Delta x'}{\sqrt{1-\beta^2}}, \tag{18}$$

откуда

$$\Delta x' = \Delta x\sqrt{1-\beta^2} \text{ или } l = l_0\sqrt{1-\beta^2} \tag{19}$$

Таким образом, длина отрезка является максимальной в той системе, относительно которой он покоится. В любой другой системе его длина будет меньше. В этом эффекте (сокращение длины движущегося отрезка) нет никакой мистики. Это просто следствие принятого нами определения длины при котором координаты концов отрезка должны измеряться одновременно.

Здесь необходимо отметить, что требование одновременности измерения концов отрезка имеет место и в нерелятивистском случае. Пусть, например, в S системе покоится отрезок длины L, координаты концов которого x_1 и x_2, соответственно, так что $L = x_2 - x_1$. В системе S', движущейся в положительном направлении x системы S со скоростью V, эти же координаты в разные моменты времени будут $x_1' = x_1 - Vt_1$, $x_2' = x_2 - Vt_2$. Очевидно, что $x_2' - x_1'$ будет равно L, только при $t_2 = t_1$, то есть, только в том случае, когда концы отрезка измеряются в S' системе одновременно.

Некоторые так называемые парадоксы как раз и возникают, если этого обстоятельства (одновременности измерения концов) не учитывать.

По поводу того реально ли лоренцево сокращение или нет здесь уместно привести слова Эйнштейна (цитируется по [1]): "Вопрос о том, реально ли лоренцево сокращение или нет, не имеет смысла. Сокращение не является реальным, поскольку оно не существует для наблюдателя, движущегося вместе с телом; однако оно реально, так как оно может быть принципиально доказано физическими средствами для наблюдателя, не движущегося вместе с телом".

Здесь следует различать длину отрезка так, как она определена выше и ту длину, которую мы реально увидим посмотрев на движущийся объект или сфотографировав его. При этом изображение объекта формируется лучами света, которые приходят на сетчатку глаза или на фотопластинку одновременно. Если объект движется, то свет, который к нам приходит одновременно, отражается от разных точек объекта в *разное* время. Поэтому размеры сфотографированного тела не будут соответствовать формуле (19). Этот вопрос о видимой форме тел, движущихся с релятивистской скоростью широко обсуждался в научной литературе в середине прошлого века (см. [1, 2, 3]) и цитированную там литературу). Оказалось, например, что видимая форма движущегося шара таковой и останется, а движущийся куб будет виден как тот же самый куб, но повернутый на некоторый угол вокруг своей оси. То есть при наблюдении или фотографировании этих объектов мы никакого лоренцева сокращения не увидим. В этом смысле в физической реальности лоренцева сокращения (независящей от того, смотрим мы на объект или нет)) можно убедиться только экспериментальным путем, говоря словами Эйнштейна, "физическими средствами". Например, в физике высоких энергий при столкновении двух ядер, движущихся с релятивистскими скоростями, угловое распределение рождающихся при столкновении частиц можно объяснить только если считать, что сталкивающиеся ядра являются не шарами радиуса R, а эллипсоидами с короткой полуосью, равной $R\sqrt{1-\beta^2}$, в соответствии с формулой (19). Таким образом, лоренцево сокращение является вполне реальным физическим эффектом.

6. *Замедление времени.* Пусть в системе S в некоторой точке А ($\Delta x = 0$) происходят два события (например, рождение и смерть) с интервалом Δt. Из выражения для $\Delta X'$ и $\Delta t'$ в (10) получим, что в системе S' пространственный и временной интервалы между этими событиями есть, соответственно:

$$\Delta x' = \frac{-V\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{20}$$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{21}$$

Таким образом, в системе S' эти два события происходят в разных точках и между ними событиями пройдет больше времени, то есть, в этой системе время течет медленнее. Здесь следует подчеркнуть, что в (21) Δt это время по часам, которые покоятся относительно точки А, а $\Delta t'$ это время, измеренное по часам, которые движутся относительно точки А со скоростью V. Таким образом, интервал времени по часам, которые покоятся относительно точки А, является наименьшим. Этот интервал времени называется собственным и обозначается Δt_0. Интервал времени между теми же событиями, измеренный по часам, движущимися относительно точки А, всегда будет больше собственного времени Δt_0. Таким образом, часы в S' системе идут медленнее *по сравнению* с часами системы S, относительно которой S' система движется с постоянной скоростью. То есть, они идут медленнее с точки зрения наблюдателя в системе S. Но с точки зрения наблюдателя S' именно наблюдатель S движется относительно него со скоростью V и поэтому наблюдатель в S' увидит, что медленнее идут часы в S. Однако, если не сравнивать скорость хода часов в разных инерциальных системах, и смотреть только за своими часами, то скорость их хода будет всегда одной и той же.

На первый взгляд в сказанном выше содержится некоторое противоречие, которое уже через несколько лет после создания специальной теории относительности было сформулировано в виде так называемого "парадокса близнецов". Суть парадокса близнецов состоит в следующем. Имеется два брата-близнеца. Один из них, назовем его А, отправляется на космическом корабле к ближайшей звезде Альфа-Центавра, до которой свет идет 4 года, и затем возвращается обратно на Землю. Пусть его корабль имеет скорость близкую к скорости света: $V = 0.99c$. Рассмотрим этот процесс с точки зрения брата В, который остался на Земле. По часам В его брат А долетит до звезды за время $\Delta t = L/c = 4$ года и в его системе $\Delta x = L$, где L расстояние от Земли до звезды. В системе отсчета В $\Delta x' = 0$. Тогда из первого уравнения в (10) получим $\Delta x = V\Delta t$ и, подставляя это в последнее уравнение (10), получим $\Delta t' = \Delta t\sqrt{1-v^2/c^2} = 4\ \texttt{года} \times \sqrt{1-0.99^2} = 0.56\ \texttt{года}$. Рассмотрев подобным же образом обратный путь А на Землю, убедимся, что на все путешествие у него уйдет $2 \times 0.56 = 1.12$ года, тогда как на Земле за это время пройдет 8 лет, то есть, по возвращении А окажется моложе своего брата. Здесь еще никакого парадокса нет. Парадокс возникает, если рассмотреть эту же проблему с точки зрения брата А. С его точки зрения именно он находится в покое, а движется брат В. Проделав тот же самый расчет, мы получим, что моложе окажется брат В. Разрешение этого парадокса состоит в том, что на самом деле эти две системы отсчета, в которых находятся А и В, не являются равноправными. Чтобы вернуться на Землю В вынужден где-то тормозить, ускоряться, поворачивать, двигаться по криволинейной траектории. В результате он испытывает действие сил инерции (чего не испытывает А). Система отсчета А не является инерционной, поэтому приведенный нами анализ к этой ситуации неприменим. Детальный расчет, выходящий за рамки СТО, показывает, что моложе окажется именно брат А.

По поводу эффекта замедления времени в СТО существовало (да и сейчас тоже существует: достаточно посмотреть в Интернете) множество разнообразных парадоксов (самый известный- парадокс близнецов) и антинаучных спекуляций. И это несмотря на то, что этот эффект многократно подтвержден экспериментально как в рутинных экспериментах с элементарными частицами на ускорителях, так и в экспериментах с реальными цезиевыми часами (одни часы оставались на земле, а другие на самолете облетали Землю и затем их показания сравнивались). Кроме того, этот эффект учитывается при корректировке хода часов, установленных на спутниках Глобальной Системы Позиционирования (GPS), для того, чтобы часы на Земле и на спутниках показывали одно и тоже время в один и тот же момент.

Список литературы

[1] Смородинский А. Я., Угаров В. А. Два парадокса специальной теории относительности.- Эйнштейновский сборник, 1972, М.: НАУКА 1974, 390 с.

[2] Фейнберг Е. Л. Можно ли рассматривать релятивистское изменение масштабов длины и времени как результат действия некоторых сил? Успехи Физических Наук **116**, 709 (1975).

[3] Фейнберг Е. Л. Специальная теория относительности-природа добросовестных заблуждений.- Успехи Физических Наук **167**, 455 (1997).