2.6. Интервал. Четырехмерное пространство-время.

2.6.1. Интервал.

В классической механике Ньютона пространство и время считались независимыми друг от друга. Поэтому расстояние между двумя точками и промежутки времени являлись *инвариантами*, т.е. были одинаковыми во всех системах отсчета.

В релятивистской механике такая инвариантность утрачена: Δr и Δt изменяются при преобразованиях Лоренца (см §§ 2.3 - 2.5). В релятивистской теории имеется один пространственно-временной инвариант, связывающий координаты и время, – *пространственно-временной интервал* или просто *интервал*. Интервал между двумя событиями, определяемыми точками (t_1,x_1,y_1,z_1) и (t_2,x_2,y_2,z_2) есть величина S, квадрат которой равен:

$$S^2=c^2(t_2-t_1)^2-(x_2-x_1)^2-(y_2-y_1)^2-(z_2-z_1)^2=Inv \tag{2.6.1}$$

Легко убедиться, что это инвариант, подставив в (2.6.1) преобразования Лоренца для разностей координат:

$$x_2-x_1=\frac{x_2'-x_1'+V(t_2'-t_1')}{\sqrt{1-\beta^2}},\quad t_2-t_1=\frac{t_2'-t_1'+\frac{V}{c^2}(x_2'-x_1')}{\sqrt{1-\beta^2}},$$
$$y_2-y_1=y_2'-y_1',\qquad z_2-z_1=z_2'-z_1' \tag{2.6.2}$$

$$S^2=\gamma^2\left(c^2(t_2'-t_1')^2+\frac{V^2}{c^2}(x_2'-x_1')^2+c^2\frac{2V}{c^2}(t_2'-t_1')(x_2'-x_1')\right)-$$
$$-\gamma^2\left((x_2'-x_1')^2+2V(t_2'-t_1')(x_2'-x_1')+V^2(t_2'-t_1')^2\right)-(y_2'-y_1')^2-(z_2'-z_1')^2=$$
$$=c^2(t_2'-t_1')^2-(x_2'-x_1')^2-(y_2'-y_1')^2-(z_2'-z_1')^2=S'^2=Inv \tag{2.6.3}$$

Здесь, как и ранее, ввели обозначение

$$\gamma^{-1}=\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}=\sqrt{1-\beta^2} \tag{2.6.4}$$

Итак, получаем инвариантную величину – интервал

$$S=S'=inv=\sqrt{c^2\Delta t^2-\Delta x^2-\Delta y^2-\Delta z^2} \tag{2.6.5}$$

Для бесконечно малых интервалов имеем:

$$dS^2=c^2dt^2-dx^2-dy^2-dz^2 \tag{2.6.6}$$

Наиболее ясный физический смысл интервал приобретает при введении 4-х мерного пространства – времени.

2.6.2. Пространство Минковского.

Г. Минковский (*Герман Минковский, немецкий математик и физик, 1864-1909*) для описания пространственно-временных событий ввел геометрическую интерпретацию: совокупность (x,y,z,t) представляет собой *мировую точку*, а многообразие мировых точек образует *четырехмерное пространство*, называемое пространством Минковского. Линия в пространстве Минковского – *мировая линия*.

Геометрия пространства Минковского определяется инвариантным расстоянием между двумя мировыми точками, которое и есть интервал между этими событиями.

Введем понятие *4х-вектора пространства-времени*, определяя компоненты этого вектора следующим образом:

$$x^0=ct\equiv\tau,\quad x^1=x,\quad x^2=y,\quad x^3=z$$
$$(ct,x,y,z)\equiv(ct,\vec{r}) \tag{2.6.7}$$

Формулы преобразования «нулевой» и «первой» компонент 4х-вектора при переходе к другой системе отсчета можно записать:

$$x^0=ct=c\frac{t'+\frac{V}{c^2}x'}{\sqrt{1-\beta^2}}=\frac{x'^0+\beta x'^1}{\sqrt{1-\beta^2}}=\gamma\left(x'^0+\beta x'^1\right) \tag{2.6.8}$$

$$x^1=\frac{x'^1+\beta x'^0}{\sqrt{1-\beta^2}}=\gamma\left(x'^1+\beta x'^0\right) \qquad (2.6.9)$$

Вторая и третья компоненты не меняются при переходах к другой системе отсчета. Формулы полного преобразования Лоренца могут быть представлены в виде системы:

$$\begin{cases} x^0=\gamma x'^0+\beta\gamma x'^1+0\cdot x'^2+0\cdot x'^3 \\ x^1=\beta\gamma x'^0+\gamma x'^1+0\cdot x'^2+0\cdot x'^3 \\ x^2=0\cdot x'^0+0\cdot x'^1+1\cdot x'^2+0\cdot x'^3 \\ x^3=0\cdot x'^0+0\cdot x'^1+0\cdot x'^2+1\cdot x'^3 \end{cases} \qquad (2.6.10)$$

Обычно вводят *матрицу преобразования* α^{ik} :

$$x^i=\sum_k \alpha^{ik}x'^k \equiv \alpha^{ik}x'^k, \qquad (2.6.11)$$

где значки i,k пробегают значения от нуля (нулевая или временная компонента) до 3 (пространственные компоненты), причем в короткой записи формул подразумевается суммирование по повторяющимся значкам. Сама матрица имеет вид:

$$\alpha=\left(\alpha^{ik}\right)=\begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma & 0 & 0 \\ \beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (2.6.12)$$

Поэтому преобразования Лоренца представляются в виде:

$$\begin{pmatrix} x^0 \\ x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma & 0 & 0 \\ \beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x'^0 \\ x'^1 \\ x'^2 \\ x'^3 \end{pmatrix} \qquad (2.6.13)$$

где новый 4-х радиус-вектор получается по обычным правилам перемножения матрицы на столбец. Обратное преобразование имеет вид:

$$\begin{pmatrix} x'^0 \\ x'^1 \\ x'^2 \\ x'^3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x^0 \\ x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix} \qquad (2.6.14)$$

Квадрат “длины” 4х радиуса-вектора есть квадрат интервала, отсчитанный от начала системы отсчета:

$$S^2=c^2t^2-x^2-y^2-z^2=\left(x^0\right)^2-\left(x^1\right)^2-\left(x^2\right)^2-\left(x^3\right)^2 \qquad (2.6.15)$$

Смысл преобразований Лоренца – это поворот 4х мерной системы координат, при этом при любых поворотах “длина” 4-х-вектора не меняется, то есть интервал (расстояние между 2-мя мировыми точками) остается постоянным.

2.6.3. <u>4-х векторы</u>

При построении релятивистской механики в 4х мерном пространстве- времени, помимо 4х радиуса-вектора, вводятся и другие 4х вектора для описания физических величин.

<u>Общее определение</u>: *4-х мерным вектором* A^i называется совокупность четырех величин $\left(A^0,A^1,A^2,A^3\right)$, которые при преобразовании 4-х мерной системы координат преобразуются как компоненты 4-х радиуса -вектора x^i:

$$A'^0=\gamma\left(A^0-\beta A^1\right); \qquad A'^1=\gamma\left(A^1-\beta A^0\right); \qquad A'^2=A^2; \qquad A'^3=A^3. \qquad (2.6.16)$$

Инвариантная величина – “квадрат длины” 4-х вектора A:

$$A^{0^2}-A^{1^2}-A^{2^2}-A^{3^2}=inv \qquad (2.6.17)$$

Обычное название для вектора с компонентами $\{A^i\}$ (с верхними индексами) – *контравариантный вектор*. Для симметрии вводят другие компоненты (с нижними индексами):

$$A_0=A^0, \quad A_1=-A^1, \quad A_2=-A^2, \quad A_3=-A^3 \tag{2.6.18}$$

Вектор с компонентами $\{A_i\}$ называется *ковариантным вектором*. Тогда квадрат 4-х вектора или скалярное произведение двух 4-х векторов записывают таким образом:

$$\sum_{i=0}^{3} A^i A_i = A^0 A_0 + A^1 A_1 + A^2 A_2 + A^3 A_3 = inv \tag{2.6.19}$$

$$\sum_{i=0}^{3} A^i B_i = A^0 B_0 + A^1 B_1 + A^2 B_2 + A^3 B_3 = inv$$

Примечание 1: Иногда в литературе для пространственного 4-х вектора вводят другие компоненты:

$$x_1=x, \quad x_2=y, \quad x_3=z, \quad x_4=ict,$$

тогда интервал записывается следующим образом:

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = -S^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$$

2.6.4. Геометрическая иллюстрация 4х радиуса-вектора.

Часто о геометрии 4х-мерного пространства Минковского говорят как о псевдоэвклидовой геометрии. Поскольку 4х -мерное пространство нам не изобразить, рассмотрим для простоты геометрическую иллюстрацию различных событий на плоскости (ct, x).

1). Так на рис.6.1 приведены примеры нескольких мировых линий: *а*) мировая линия покоящейся частицы – линия параллельная оси времени; *б*) мировая линия равномерно движущейся частицы направлена под углом к оси времени, причем, чем больше угол θ (но не превышающий $45°$), тем выше скорость

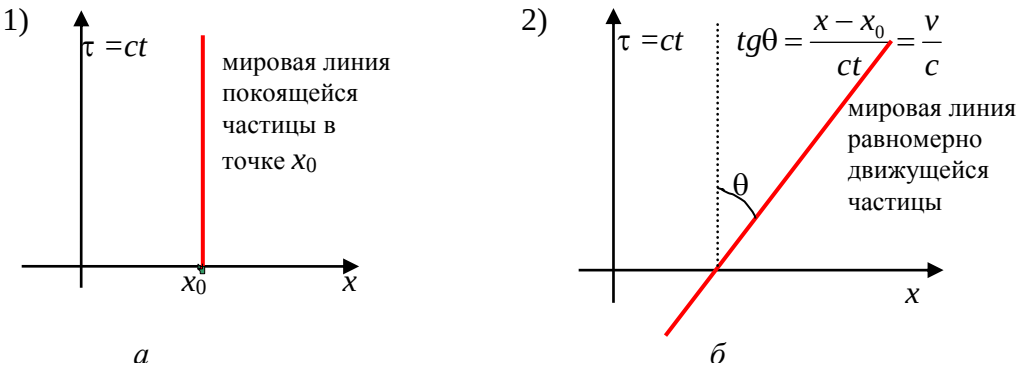

Рис. 6.1.

частицы.

2) Пусть имеется 2 события в точках A и B (см рис. 6.2). “Расстояние” между двумя событиями есть интервал, равный

$$(AB)^2 = (\tau_2 - \tau_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 = (BC)^2 - (AC)^2 \tag{2.6.20}$$

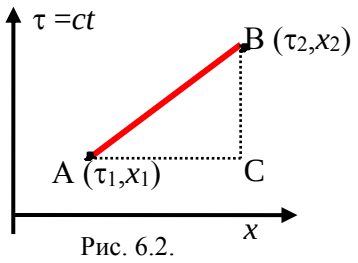

Рис. 6.2.

Из (2.6.20) видно, что гипотенуза (AB), образованного треугольника на плоскости (ct,x), меньше катета (BC). В этом состоит суть псевдоевклидовой геометрии, где вместо обычной теоремы Пифагора справедлива псевдопифагорова теорема.

3) Отметим важное обстоятельство, что вообще все интервалы $S = \sqrt{\tau^2 - x^2}$ между событиями можно разделить на 2 типа: *вещественные* и чисто *мнимые*. Это деление не зависит от выбора системы отсчета (СО). Границей между 2 типами интервалов – *нулевой интервал* $S = 0$, т.е. $ct = x$ и $ct = -x$. Нулевые интервалы образуют мировые линии световых лучей. Такой интервал существует между событиями, которые могут быть связаны сигналом, распространяющимся со

скоростью света. Мировые линии световых лучей разбивают плоскость на 4 квадранта (см рис. 6.3). Пусть в точке 0 наступило событие 1 ($x = t = 0$). Тогда I и II квадранты определяют абсолютное будущее и абсолютное прошлое соответственно, а III и IV квадранты представляют абсолютно удаленные события относительно события 1. Рассмотрим подробнее интервалы в этих квадрантах.

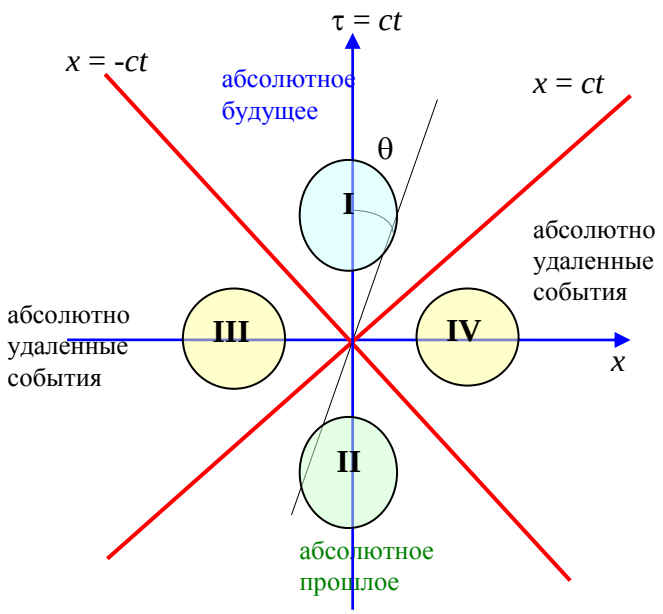

Рис. 6.3.

Времениподобный интервал S (вещественный):

$$S^2 = \tau^2 - x^2 > 0. \qquad (2.6.21)$$

Квадрант I: для всех событий $\tau > 0$, следовательно, все они произойдут позднее события 1 (точка в начале отсчета). Это область *абсолютного будущего* по отношению к началу отсчета. Квадрант II: здесь тоже времениподобный интервал, но для его мировых точек $\tau < 0$ – область *абсолютного прошлого* по отношению к началу отсчета.

Пространственноподобный интервал S (мнимый):

$$S^2 = \tau^2 - x^2 < 0. \qquad (2.6.22)$$

Все события в III и IV квадрантах происходят в точках, никак не связанных с точкой, где произошло событие 1. Однако моменты времени, в которые произошли события в квадрантах III и IV, могут быть сделаны раньше или позже события 1 за счет выбора соответствующей системы координат.

Итак, характер интервала между событиями зависит от наклона прямой, соединяющей эти точки на псевдоевклидовой плоскости. Если угол $\theta = 45^0$, то имеем *светоподобный* интервал $S^2 = 0$.

Времениподобный интервал – это интервал между двумя событиями, для которых существует система отсчета, где эти события произошли в одной точке пространства:

$$S^2 = c^2 t_1^2 - x_1^2 = c^2 t_2^2 > 0 \qquad (2.6.23)$$

Тогда время между этими событиями определяется как отношение интервала и скорости:

$$t_2 = \frac{1}{c}\sqrt{c^2 t_1^2 - x_1^2} = \frac{S}{c} \qquad (2.6.24)$$

Если события происходят с одним и тем же телом, то интервал всегда времениподобный. Только в этом случае имеется “*причинная*” связь, так как есть понятие раньше и позже.

Пространственноподобный интервал – это интервал между 2-мя событиями, для которых существует система отсчета, когда эти события произошли в одно и то же время и тогда расстояние между ними:

$$x'_{12} = \sqrt{x_{12}^2 - c^2 t_{12}^2} = iS_{12} \qquad (2.6.25)$$

Такое подразделение интервалов – *абсолютное*, т.е. не зависит от системы отсчета.

2.6.5. Геометрическое истолкование преобразований Лоренца.

Рассмотрим мировую линию равномерно движущейся точки (рис.6.4). В K системе – это линия, направленная под углом к оси τ. Если рассмотрим эту точку в системе K', где эта точка покоится, то видно, что ось $\tau' = ct'$ должна быть направлена параллельно прямой $x' = x'_0$. Следовательно преобразование оси $\tau = ct$ при переходе от системы K к K' системе наклоняет эту ось по отношению к оси τ. Ось x' должна быть направлена так, чтобы располагаться симметрично относительно нулевого интервала (световой мировой линии) как τ'. Таким образом, преобразования

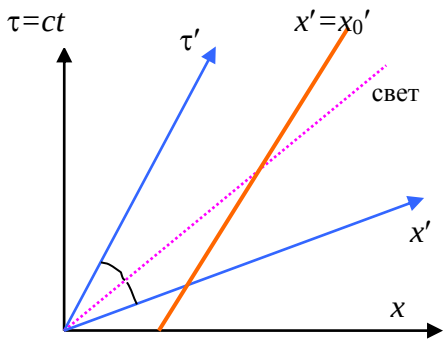

Рис. 6.4.

Лоренца приводят к расположению осей τ' и x' как показано на рисунке 6.4.

Для того чтобы проиллюстрировать преобразования Лоренца, интервал и следствия из преобразований, проградуируем оси координат с помощью длины, определяемой единичным квадратом интервала:

$$\tau^2 - x^2 = 1 = inv = \tau'^2 - x'^2 \qquad (2.6.26)$$

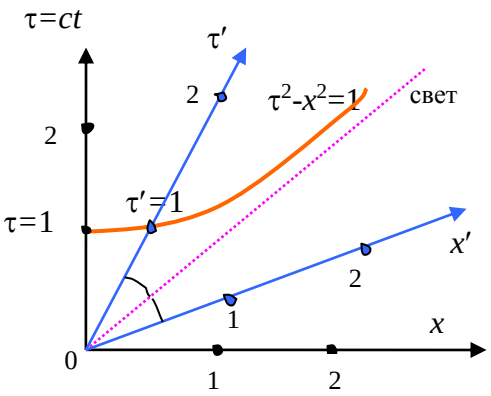

Рис. 6.5.

Если построить (2.6.26), то получим кривую – гиперболу (красная кривая на рис.6.5). Причем при $x = 0$ получаем $\tau = 1$ в лабораторной системе отсчета К. В системе отсчета К' при пересечении гиперболы с осью τ' , т.е. при $x' = 0$, получаем τ' = 1, и таким образом, отрезок от τ' = 0 до τ' = 1 дает единичный масштаб (линейку) в движущейся системе отсчета. Аналогично получаем градуировку по осям x и x', если положить квадрат интервала (2.6.26) равным –1 (мнимый интервал, см ниже рис. 6.7). Видно даже из рисунка 6.5, что масштаб линейки в системе К' больше, чем в системе К, что и приводит к рассмотренным выше следствиям.

Разберем одновременность событий в каждой из систем и ход часов. Линии одновременности в системах К и К' определяются прямыми, параллельными осям x и x', соответственно сплошная красная и синяя пунктирная линии на рисунке 6.6. Имеем две возможности: рассмотреть эти события в системах К и К'.

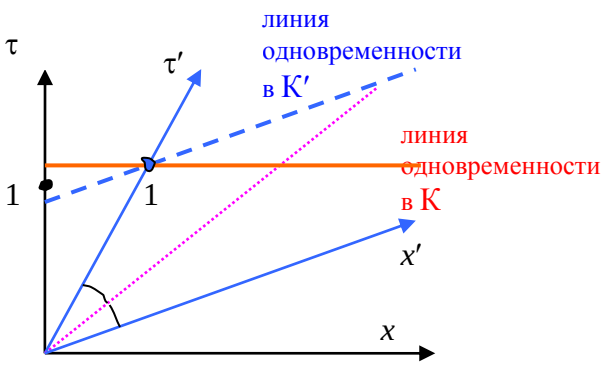

Рис. 6.6.

1). <u>Смотрим с точки зрения наблюдателя в системе К'</u> (относительно которого движутся часы К системы): пусть часы, помещенные в начале координат ($x' = 0$) показывают "время" τ' = 1; тогда по линии одновременности (синяя прямая) видно, что на часах лабораторной системы К еще нет 1 (τ' < 1), т.е. они отстают.

2). <u>Теперь смотрим с точки зрения наблюдателя в системе К</u> (относительно которой движутся часы системы К′): часы, помещенные в начале координат лабораторной системы ($x = 0$), показывают время τ > 1; в то же время по линии одновременности (красная прямая) в системе К часы в К′ системе дают τ' = 1 (при $x' = 0$), т.е. часы отстают в системе К′.

Это и есть геометрическая иллюстрация замедления хода времени в движущихся объектах.

Рассмотрим теперь Лоренцево сокращение длины (рис. 6.7). Пусть метровый стержень покоится в лабораторной системе отсчета К, причем левый конец стержня находится при координате $x = 0$ (τ = 0), а правый – при $x = 1$ и, соответственно, его длина равна 1 (зеленая линия на рис. 6.7). Мировая линия левого конца идет по оси τ при $x = 0$, а правого – параллельно оси τ при $x = 1$. По пересечению мировой линии и оси x' получаем размер стержня в системе К′. Видно, что его длина, равная 0А, меньше единицы 1 в масштабе системы К′.

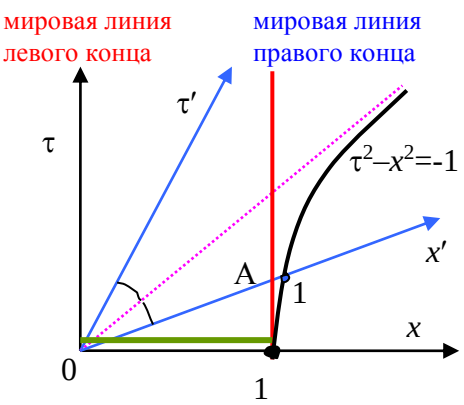

Рис. 6.7.

Рассмотрим теперь, когда стержень покоится в системе К′ (зеленая линия на рис. 6.8), где его длина равна 1 (0А). Тогда используя мировую линию правого конца, которая параллельна оси τ' (голубая линия на рис. 6.8), получим длину стержня в системе К (0В), длина которого по линейным масштабам К системы меньше 1.

Таким образом, получаем, что стержень, движущийся относительно наблюдателя имеет всегда меньшую длину, чем в системе, связанной с ним.

Для системы отсчета K'', движущейся в отрицательном направлении оси x, иллюстрация аналогична. Однако при этом надо иметь ввиду, что если в K системе угол между осями τ и x - прямой, то в системе K'' угол между осями τ'' и x'' – больше $\pi/2$ (развернутый угол). При этом эффекты появляются те же и также могут быть проиллюстрированы геометрически.

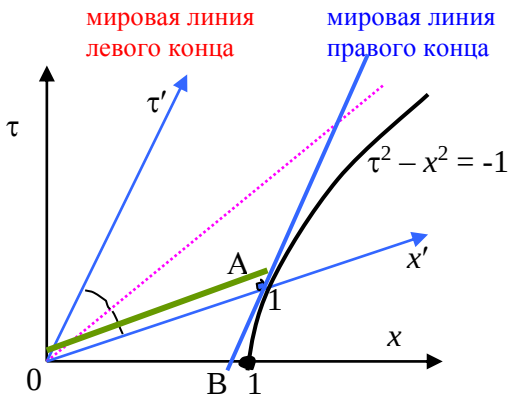

Рис. 6.8.

2.6.6. Парадокс близнецов и другие парадоксы.

Самый распространенный прием критиков и противников СТО – обнаружить парадоксы, к которым якобы приводит теория относительности. Одним из самых известных парадоксов – *парадокс близнецов*.

Рассуждения, приводящие к якобы парадоксу, выглядят следующим образом. Из точки $x = 0$ вылетела ракета (это Петр отправился в путешествие) со скоростью V вдоль оси x и затем возвращается обратно. С точки зрения наблюдателя на Земле (Павел, близнец Петра, остался на Земле) время в ракете течет медленнее и, следовательно, при возвращении Петр будет моложе Павла. Однако с точки зрения Петра это Земля с Павлом движется со скоростью "$-V$", затем движется обратно и, следовательно, при встрече должен быть моложе Павел. Возникает противоречие и в этом состоит парадокс. Кто прав, Петр или Павел?

Неправильность рассуждения, приведшего к парадоксу, состоит в том, что *системы отсчета, связанные с близнецами – не эквивалентны*. Одна из них – инерциальная, а вторая, связанная с ракетой, является неинерциальной. Поскольку, чтобы вернуться на Землю, ракета должна повернуть обратно, при этом она испытывает изменение скорости и, следовательно, ускорение, что и есть неинерциальность. Иначе говоря, для возвращения назад Петру необходимо пересесть в другую инерциальную систему отсчета, идущую в обратную сторону, в которой отсчет времени совершенно другой. С точки зрения неподвижного наблюдателя при пересадке из одной системы в другую проходит достаточно большое время (по земным часам). Это означает, что Петр будет моложе Павла и последний прав в этом споре.

Рассмотрим численный пример (приведенный в книге Э.Ф. Тейлора и Д.А. Уилера "Физика пространства- времени"). Петру и Павлу по 21 году. Петр отправился в ракете и летел по его часам в одну сторону 7 лет (7 лет $\approx 2.2 \cdot 10^8$ секунд) со скоростью $v = \frac{24}{25}c = 0.96c$, а затем вернулся обратно с той же скоростью. Найдем возраст Павла и Петра с обеих точек зрения.

С точки зрения Павла (Земля): Петр имеет возраст $21 + 7 + 7 = 35$ лет. Время у Павла течет быстрее, и за 7 лет Петра имеем добавку к возрасту Павла:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} = \frac{7}{\sqrt{1-\frac{576}{625}}} = \frac{7\cdot 25}{7} = 25 \text{ лет}$$

Следовательно, возраст Павла равен: $21 + 25 + 25 = 71$ год.

С точки зрения Петра (ракета): возраст Петра $21 + 7 + 7 = 35$ лет. Время у Павла течет медленнее, поскольку Земля движется относительно ракеты, и за 7 лет Павел постарел только на время:

$$\Delta t = \Delta t_0 \sqrt{1-\beta^2} = \frac{7\cdot 7}{25} = 1.96 \text{ лет}$$

То есть возраст Павла равен: $21 + 1.96 + 1.96 = 24.92 \approx 25$ лет.

Различие мнений о возрасте Павла составляет 46 лет. Поскольку при встрече ситуация должна быть однозначна со всех точек зрения, то это означает, что при переходе Петра для возвращения назад из одной ИСО в другую проходит время, равное 46.08 лет.

Поясним это утверждение графически на рис.6.9. Пусть K система отсчета Павла (черный цвет осей на рисунке 6.9), тогда мировая линия Петра совпадает с временной координатой его системы отсчета K' (синий

цвет осей). По часам Петра отрезок 0T соответствует времени 7 лет, и с его точки зрения часы Павла за это время показали 1.96 года – это отрезок 0A. На обратном пути Петра от точки T до встречи с Павлом в

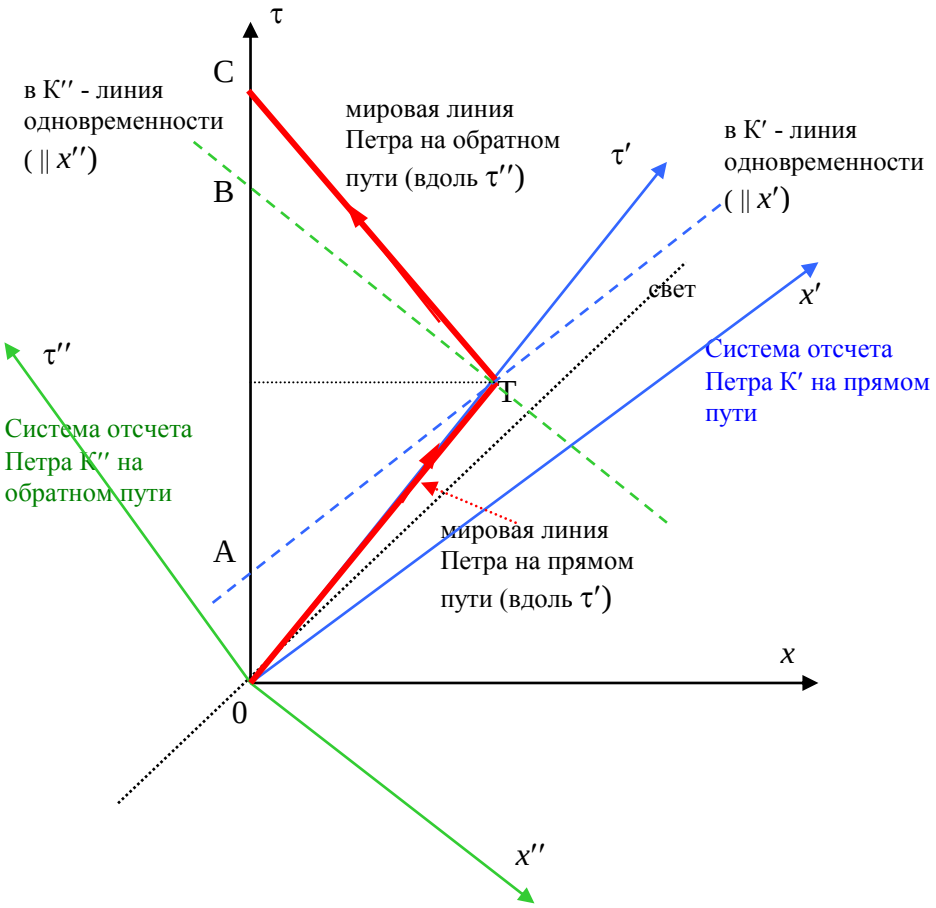

Рис. 6.9.

точке C сопровождала другая цепочка часов – другая систем отсчета – K″ (зеленый цвет осей), скорость которой направлена против оси x. (поэтому оси раздвигаются в стороны относительно осей K системы и световой мировой линии). Часы Петра на отрезке TC снова показали 7 лет, а часы Павла с точки зрения Петра, снова 1.96 года (отрезок BC). Таким образом, даже с точки зрения Петра остался неучтенным отрезок AB, который и оказывается равным 46.08 года.

Вообще можно утверждать, что протяженность наклонных линий короче, чем вертикальных линий. Это есть следствие Псевдоевклидовой геометрии (псевдопифагоровой теоремы). Время в прямой линии, параллельной оси τ, равно: Δt, в то время как в наклонной прямой имеем из постоянства интервала:

$$c^2\Delta t_0^2 = inv = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 \quad \text{и} \quad \Delta t_0 = \frac{1}{c}\sqrt{c^2\Delta t^2 - \Delta x^2} < \Delta t$$

Рассмотрим некоторые другие эффекты и парадоксы.

1). Рассмотрим стержень, расположенный параллельно оси x' в K′ системе отсчета и движущийся в ней вдоль оси y' равномерно (рис. 6.10), в K системе отсчета будет также двигаться относительно оси y равномерно, но располагаться под углом к оси x. Чем выше скорость системы K′ (или стержня по оси x) относительно системы K, тем больше угол наклона стержня в системе K.

2). <u>Парадокс шеста и сарая</u> (пенала и карандаша). Шест длиннее сарая, однако, если он движется с большой скоростью, то его длина будет меньше сарая, и он может в принципе поместиться в сарае, то есть можно будет успеть захлопнуть ворота за шестом. Это с точки зрения наблюдателя, находящегося в сарае. Однако с точки зрения наблюдателя на шесте сарай надвигается с большой скоростью на стержень, и размеры сарая

становятся еще меньше. Как же можно совместить тот факт, что в первом рассмотрении шест на некоторое

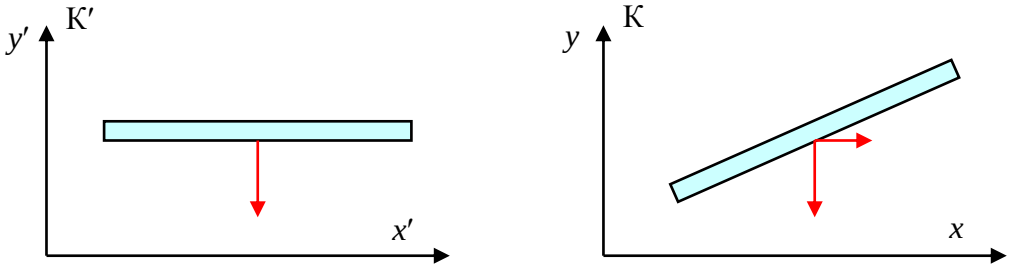

Рис. 6.10.

время может оказаться внутри сарая, а во втором не может?

3). Стержень и люк. На дырку люка падает стержень. В состоянии покоя стержень не проваливается сквозь люк, поскольку его линейные размеры больше линейных размеров люка. Другое дело, когда стержень движется с большими скоростями (рис. 6.11). Тогда в системе отсчета, связанной с люком, размеры стержня становятся малыми, и он спокойно проходит через люк. Однако в системе, связанной со стержнем, размеры люка становятся еще меньше и как же при этом можно объяснить факт прохода стержня через люк?

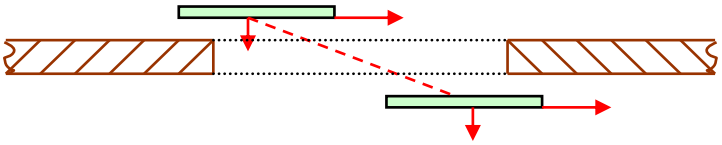

Рис. 6.11.

Рисунок 6.12, когда наклонный люк “наезжает” на стержень, проясняет, как это происходит.

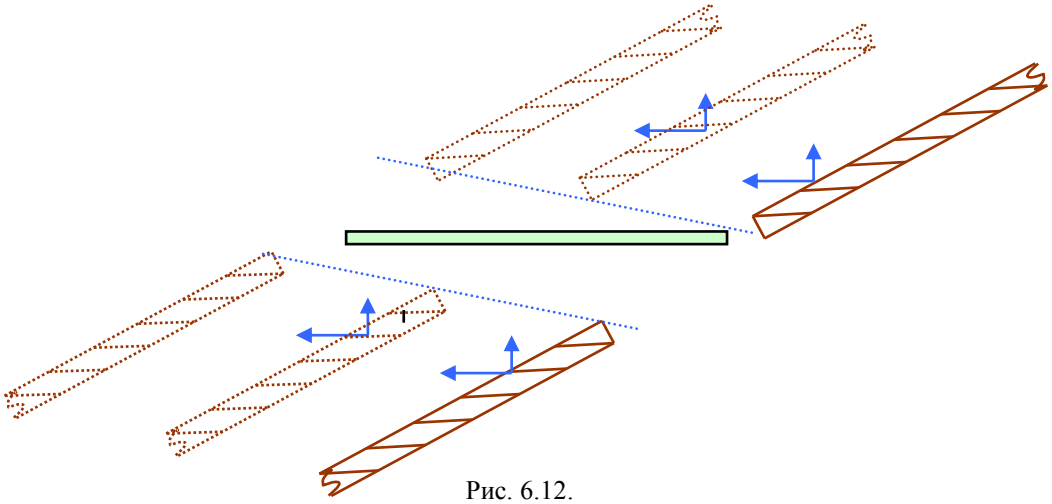

Рис. 6.12.

4). Человек на решетке или стержень на столе с дыркой. Рассмотрим случай, когда нет движения вдоль вертикальной оси.

Человек, стоящий на решетке, не проваливается сквозь нее. Однако при очень быстром перемещении

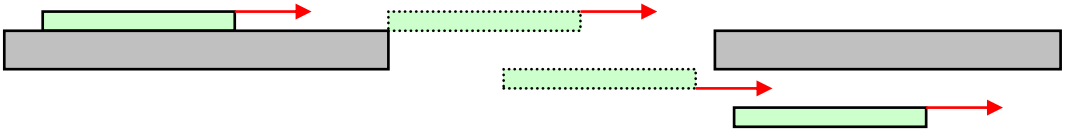

Рис. 6.13.

по решетке его размеры вдоль движения уменьшаются и становятся меньше размеров ячейки решетки с

точки зрения системы отсчета, связанной с решеткой. Значит, он может провалиться сквозь решетку (см рис. 6.13 со стержнем).

С точки зрения человека (стержня), размеры ячейки решетки становятся очень малыми по сравнению со стержнем, и, на первый взгляд, человек (стержень) не может провалиться через ячейку. Однако из преобразований Лоренца следует тот факт, что тела не бывают абсолютно твердыми или абсолютно жесткими. То есть жесткость стержня – величина относительная. В системе стержня сам стержень теряет

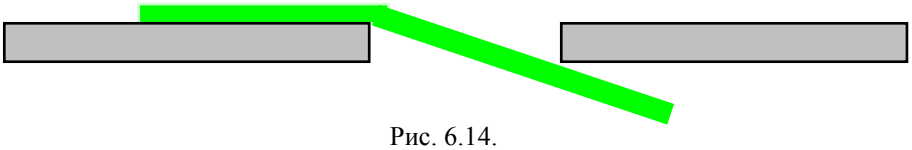

Рис. 6.14.

свою жесткость и может изгибаться и тем самым проникать в ячейку, изгибаясь, как резиновый предмет (см рис. 6.14).