2.6. Элементы специальной теории относительности

В конце XIX и начале XX века электродинамика Максвелла трудами Г. Лоренца и Дж.Дж. Томсона была соединена с электронной микроскопической теорией. Однако при попытке применить эту классическую теорию к исследованию процессов, протекающих в движущихся средах, она натолкнулась на принципиальные трудности, которые пришлось преодолевать Эйнштейну.

Затруднения с разработкой электродинамики движущихся сред, неудача опыта Майкельсона-Морли привели Эйнштейна в 1905 году к разработке новой главы современной физики – построению *специальной теории относительности*. Она появилась не случайно, а в результате попыток найти выход из очередного парадокса в физике.

Еще Галилей сформулировал в классической механике принцип относительности: законы механики должны быть одинаковыми для всех наблюдателей, которые двигаются друг относительно друга с постоянной по величине и направлению скоростью. Иными словами, он утверждал, что не существует привилегированной системы отсчета, т.е. невозможно определить абсолютную скорость.

Представим себе двух наблюдателей A и B, движущихся с относительной скоростью между ними, равной v. Выберем ось координат x в системе наблюдателя A $S(A)$, направленную вдоль этой скорости. В системе второго наблюдателя $S(B)$ координаты обозначим через x'. Пусть в начальный момент координаты x и x' будут совпадать. Со временем координатная система второго наблюдателя сместится вдоль оси x на величину vt, где t – время от начального момента $t = 0$ (*рис. 81*). Между их координатами существует очевидная связь:

$$x' = x - \mathrm{v}t\ ,\ y' = y\ ,\ z' = z,$$

что приводит к соотношениям между скоростями v и v′ соответственно в системах отсчета $S(A)$ и $S(B)$

$$\mathrm{v}' = \mathrm{v} - \mathrm{v},$$

где

$$u = dx/dt,\ u' = dx'/dt.$$

Как легко видеть, ускорения в обеих системах координат

$$a = d^2x/dt^2 = du/dt,\ a' = d^2x'^2/dt^2 = du'/dt$$

равны друг другу, ибо скорости постоянны. Закон динамики Ньютона

$$F = ma,$$

для обоих наблюдателей будет неизменен, потому что и масса, и ускорение не меняются при переходе из системы $S(A)$ к системе $S(B)$. Таким образом, мы получили математическое выражение принципа относительности Галилея.

Но именно в связи с приведенными выше преобразованиями и возникла первая брешь в принципе относительности Галилея после появления теории электромагнетизма Максвелла. Оказалось, что при одном и том же электромагнитном опыте, проведенном покоящимся и движущимся наблюдателями, получается два различных ответа.

Проиллюстрируем это на некоторой вполне конкретной электродинамической задаче. Пусть точечный электрический заряд $+e$ расположен в точке A на расстоянии r от прямой проволоки, заряженной электрическим зарядом того же знака с линейной плотностью величиной ρ (*рис. 82б*). На заряд в точке A действует электростатическая сила $f = eE$, где E – напряженность электрического поля, созданного заряженной

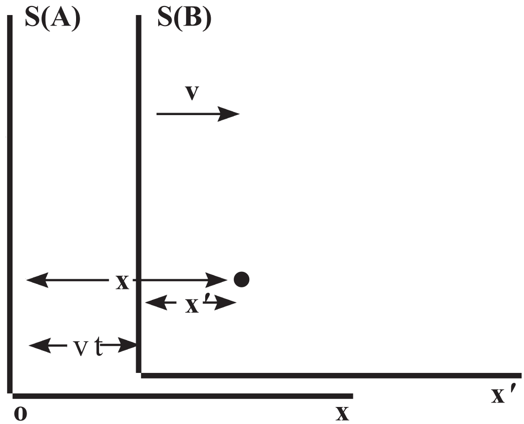


Рис. 81. *Системы координат для двух наблюдателей.*

проволокой. Из электростатики известно, что напряженность этого поля $E = 2\rho/r$, где r – расстояние от оси проволоки до точки A. Следовательно, для силы, действующей на заряд $+e$, получаем для первого наблюдателя:

$$f = 2e\rho/r. \qquad (6.1)$$

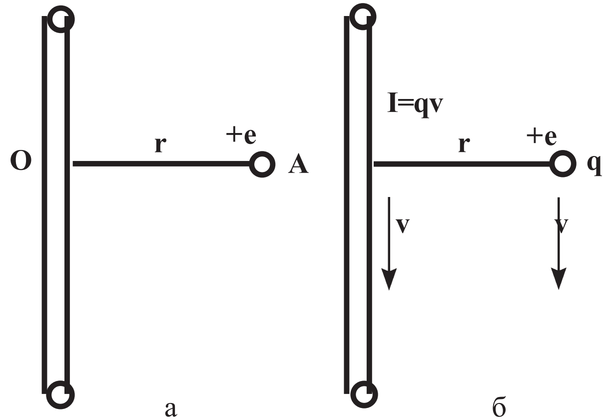


Рис. 82. *К нарушению принципа относительности Галилея в электродинамике движущихся тел.*

Выясним теперь, какую же силу будет измерять второй наблюдатель, который движется с постоянной по величине и направлению скоростью v параллельно проволоке (*рис. 82б*). Для него вдоль проволоки потечет электрический ток силой:

$$I = 2e\rho v, \qquad (6.2)$$

а заряд $+e$ будет двигаться параллельно проволоке со скоростью v вниз. Тогда, поскольку суммарный заряд на длине l участка проволоки равен ρl, при умножении равенства (6.2) на l получим:

$$Il = 2e\rho l v.$$

Из электродинамики известна сила, действующая на элемент тока I длиной l в магнитном поле напряженности H, она равна:

$$f = IlH/c,$$

где c – скорость света. Тогда магнитная сила притяжения, действующая на заряд $+e$, с точки зрения второго наблюдателя, будет равна:

$$f_н = (2e\rho/r)(v^2/c^2) \qquad (6.3)$$

и она должна вычитаться из электростатической силы отталкивания (6.1). Поэтому второй наблюдатель, движущийся со скоростью v относительно первого, обнаружит, что результирующая сила, действующая на заряд $+e$, должна быть равна по (6.1) и (6.3) величине:

$$f'=(2e\rho/r)(1 - v^2/c^2). \qquad (6.4)$$

Таким образом, из сравнения формул (6.4) и (6.1) мы видим, что для второго наблюдателя сила, действующая на заряд $+e$, будет меньше, чем для первого.

Рассмотренная типичная задача электродинамики Максвелла для электродинамики движущихся тел показала, что принцип Галилея оказался *нарушенным*, т.е. несовместимым с теорией Максвелла. Здесь были возможны три способа разрешения этой трудности – очередного парадокса физики:

1. Считать, что принцип Галилея правилен для механики, но не справедлив для электромагнетизма.

2. Считать, что принцип относительности Галилея справедлив и в механике, и в электродинамике, но при этом признать, что законы последней, как их сформулировал Максвелл, неправильны и их надо изменить.

3. Считать, что существует другой принцип (относительности), отличный от галилеевского, который должен выполняться и для механики, и для электродинамики, но тогда надо видоизменять не электродинамику, а механику.

Именно третий вариант и был выбран Эйнштейном. Дело в том, что первые два варианта после отрицательного результата в опыте Майкельсона и Морли и полной неудачи всех многочисленных попыток объяснить его в рамках первых двух вариантов, оставили для Эйнштейна только такой путь, по которому он с завидной смелостью и пошел.

Первое, что сделал Эйнштейн, – провозгласил постулат о том, что скорость света всегда одинакова во всех системах отсчета. Скорости всех остальных, не световых движений, не могут быть больше скорости света. Например, ракета никогда не сможет догнать свет! Это полностью объясняло, как уже отмечалось выше, отрицательный результат опыта Майкельсона-Морли.

Отсюда мы приходим к полному краху ньютоновских представлений об абсолютном пространстве и времени.

Здесь исторически очень важным явился вывод Эйнштейна об относительности понятия одновременности событий в разных точках пространства. При рассмотрении данной проблемы Эйнштейн опередил всех других ученых, и поэтому именно он считается главным автором теории относительности. С решения проблемы об одновременности событий в разных точках пространства и начинается история специального принципа относительности Эйнштейна.

Опять-таки рассмотрим опыт с двумя инерциальными наблюдателями. Пусть один из них стоит на платформе железнодорожной станции (назовем его наблюдателем *A*), а другой наблюдатель (назовем его наблюдателем *B*) находится в вагоне поезда, который быстро движется мимо станции (*рис. 83*). Оба они наблюдают за испущенным наблюдателем *B* световым импульсом, который распространяется от него в противоположные стороны вдоль длины вагона. Они оба видят этот эффект, но один стоит неподвижно на станции, а другой едет в вагоне движущегося поезда. Наблюдатель *B* зажигает лампу, а его коллега *A* на платформе станции ждет, когда сверхскорый поезд промчится мимо него.

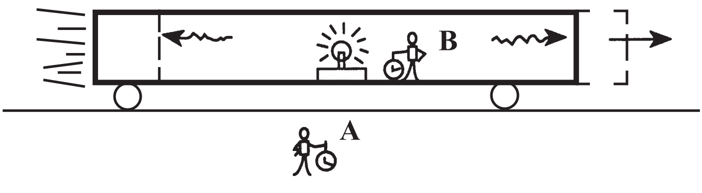


Рис. 83. *К вопросу об относительности одновременности событий в двух разных точках пространства.*

В некий момент в руках наблюдателя *B* на мгновение вспыхивает лампа в середине вагона, т.е. посылается короткий импульс света в оба конца вагона. Наблюдатели *A* и *B* одновременно регистрируют момент вспышки лампы, а затем регистрируют и моменты времени для каждого из двух сигналов, летящих в разные стороны вагона, когда они достигают двух его противоположных стенок в правой и левой стороне.

Наблюдатель *B* видит, что сигналы доходят до противоположных стенок вагона *одновременно*. Наблюдатель же *A* видит, что левой стенки свет достигает раньше, чем правой, из-за движения вагона поезда слева направо. Таким образом, наблюдатели *A* и *B* регистрируют *разные варианты одних и тех же событий*. Кто из них прав? По теории относительности Эйнштейна правы оба наблюдателя. Одновременность двух пространственно разделенных событий не есть *абсолютное* свойство самих событий, а лишь следствие *способа их рассмотрения*. Еще удивительнее будет результат с третьим наблюдателем *C*, который едет во втором вагоне поезда, по параллельному пути. Если он движется быстрее второго наблюдателя *B*, так что относительно *C* наблюдатель *B* будет двигаться налево, то, воспользовавшись прежними рассуждениями, получим последовательность событий, обратную той, что отмечал наблюдатель *A*.

Таким образом, теория относительности, не нарушая последовательность событий, которые происходят в одном месте пространства, для событий в разных точках пространства дает неодинаковый ответ. Поскольку сигналы не могут распространяться быстрее скорости света *c*, то ни один наблюдатель не сможет настолько изменить свое состояние так, чтобы в другой системе отсчета с его точки зрения время пошло бы в обратную сторону. Единственно на чем может сказаться существенно состояние его движения – на наблюдаемой скорости хода его часов. Хотя порядок во времени двух событий, происходящих в одном и том же месте пространства (например, боя часов), инвариантен, интервал времени между ними относителен.

Вернемся вновь к наблюдателям *A* и *B*, которые двигаются относительно друг друга со скоростью v, направленной по оси x (*рис. 81*). Наблюдатель *A* в своей системе отсчета измеряет координату x в некоторой точке, а наблюдатель B в своей (штрихованной) координату x' в этой же точке, связанные так:

$$x = x' + \mathrm{v}t'. \tag{6.5}$$

Теперь учтем, что скорость света всегда и везде постоянна и равна c, и нет абсолютной одновременности, т.е. надо положить, что времена у различных наблюдателей различны: $t' \neq t$. Простейшее обобщение соотношения (6.5), учитывающее эти изменения и гарантирующее переход к галилеевой механике для скоростей, очень малых по сравнению с предельной скоростью c, будет иметь вид:

$$x = \gamma(x' + \mathrm{v}t'), \qquad (6.6)$$

где множитель γ должен стремиться к единице при $\mathrm{v} << c$, т.е. при малых скоростях, когда справедлива механика Галилея-Ньютона. Системы отсчета (A) и (B) равноправны, поэтому для наблюдателя B

$$x' = \gamma(x - \mathrm{v}t). \qquad (6.7)$$

Математически требование равенства скорости света c в системах отсчета *(A)* и *(B)* имеет вид:

$$x = ct \text{ и } x' = ct'.$$

Подставляя эти величины в (6.6) и (6.7), получаем:

$$ct = \gamma(ct' + \mathrm{v}t') = \gamma(c + \mathrm{v})t',\ 1 = \gamma(1 + \mathrm{v}/c)t'/t,$$

$$ct' = \gamma(ct - \mathrm{v}t) = \gamma(c - \mathrm{v})t,\ 1 = \gamma(1 - \mathrm{v}/c)t/t'.$$

Перемножая два последних правых равенства друг на друга, находим

$$1 = \gamma^2\{1 - (\mathrm{v}/c)^2\},$$

откуда

$$\gamma = 1/(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2}. \qquad (6.8)$$

Этот множитель действительно обращается в единицу, когда скорость тела гораздо меньше скорости света, т.е. $\mathrm{v} << c$.

Для выяснения роли множителя γ в связи со значениями интервалов времени, измеряемых наблюдателями A и B, нужно из (6.6) и (6.7) исключить координаты x и x' через отношения t/c и t'/c, что дает:

$$t' = (t - \mathrm{v}x/c^2)/(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2}. \qquad (6.9)$$

Равенство (6.9) дает связь времени t', измеренного наблюдателем B, со временем t, измеренным наблюдателем A в точке пространства x. Для события в определенной точке в системе отсчета (A) координата x постоянна. Это означает, что интервал времени между двумя событиями 1 и 2, равный $t'_2 - t'_1$ при измерении их наблюдателем B, связан с соответствующим интервалом $t_2 - t_1$, измеряемым наблюдателем A, равенством:

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \gamma(t_2 - t_1) = \gamma\Delta t \ ,$$

которое иначе запишется так:

$$\Delta t' = \Delta t(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{-1/2} \qquad (6.10)$$

Из выражения (6.10) видно, что интервалы времени будут разными при v ≠ 0, т.е. наблюдатели *A* и *B* получают различные результаты для определения промежутков времени между различными событиями.

Рассмотренный эффект очень мал. Даже для ракеты, которая движется со скоростью в 50 000 км/час, v/*c* = 0,00005, а величина γ = 1,000 000 001 – наблюдатель на ракете будет констатировать, что интервалы времени на Земле удлинились лишь на одну десятимиллионную долю процента. Часы на быстрой ракете для наблюдателя на Земле замедляют свой ход по сравнению с аналогичными часами, которые находятся на Земле, что является свойством пространства-времени и не зависит от механизма часов. Эффект замедления часов проявляется лишь тогда, когда наблюдатель исследует другие системы, относительно которых он движется. Из соотношения (6.10) видно, что при v = *c* величина γ становится равной бесконечности, т.е. для наблюдателя, путешествующего со скоростью света *c*, все другие часы в других системах отсчета бездействуют – течение времени полностью останавливается. Поэтому говорят, что световой луч не «чувствует» времени.

Течение любого физического процесса, включая и распады атомных частиц, например, радиоактивный распад атомных ядер, для наблюдателя, движущегося со скоростью v, должны *замедляться* в $(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2}$ раз.

Этот эффект проявляется также в увеличении времени жизни микрочастиц, которое можно наблюдать непосредственно на опыте, что и измеряли фактически, на пучке стабильных пионов. Пион в неподвижном состоянии имеет время жизни *t*, равное $1{,}8\times10^{-8}$ с, а пучок движущихся пионов можно получить в ускорителе. Пусть скорость пионного пучка будет равна v = 0,6 *c*. Наблюдаемое время жизни для пионов пучка $t' = t/(1 - 0{,}6^2)^{1/2} = 1{,}25$, т.е. время жизни неподвижного пиона t' увеличится на 25%, оно равно $t' = 2{,}25\times10^{-8}$ с, за которое пионы успевают пройти путь $d = ct' = 4{,}05$ *м*, что и измеряется на опыте в камере Вильсона.

Любопытно отметить, как пишет в одной своей статье В. Гейзенберг, что подобные опыты с мюонами не только помогли решить фундаментальный научный вопрос, но и одновременно сняли фашистский запрет на теорию относительности, наложенный гитлеровским государством. Поэтому, говорит Гейзенберг, «я всегда чувствую признательность к мюонам».

Весьма интересным является так называемый «*парадокс близнецов*», который возникает, когда один из наблюдателей улетает с Земли почти со скоростью света, а потом возвращается с той же скоростью и оказывается гораздо моложе, чем оставленный им на Земле брат близнец.

Рассмотрим этот эффект более детально. Предположим, что двум близнецам было перед началом эксперимента по 20 лет. Тогда для земного наблюдателя часы и все физические процессы, которые он наблюдает на космической ракете, летящей со скоростью v, должны замедляться в $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ раз. Пусть космический путешественник-близнец *B* – летит к звезде Арктур со скоростью $v = 0{,}9\,c$. Расстояние от Земли до нее равно 40 световым годам. С точки зрения оставшегося на Земле наблюдателя, близнеца *A*, путешествие его брата *B* займет на 1% больше времени, чем это требуется свету, чтобы достичь Арктура и вернуться обратно на Землю без остановки, что составляет 80,8 лет. Когда *B* вернется на Землю, возраст близнеца *A* будет равен $20 + 80{,}8 = 100{,}8$ лет.

Наоборот, с точки зрения путешественника близнеца В, часы на ракете будут идти медленнее в $(1 - 0{,}99^2)^{1/2} = (0{,}02)^{1/2} =$ $= 0{,}141$ раза. Значит, для близнеца *B* это время будет равно 80,8 года умноженному на 0,141, т.е. всего 11,4 года. При возвращении на Землю близнец *B* будет в возрасте $20 + 11{,}4 = 31{,}4$ года, т.е. моложе своего брата *A* на 64,4 года. Путешествующий близнец *B* не чувствует, что его время идет медленнее, но расстояние до Арктура кажется близнецу *B* укороченным благодаря лоренцевскому сокращению размеров (см. несколько ниже). По измерениям близнеца В расстояние от Земли до Арктура равно $40(1 - 0{,}99)^{1/2}$ световых лет или 5,64 световых года. Кроме того, ему кажется, что Земля удалятся от него с той же относительной скоростью $v = 0{,}99\,c$. Поэтому, согласно расчетам близнеца *B*, чтобы достичь Арктура, понадобится время на 1% больше, чем свету, т.е. 5,7 световых лет, а чтобы вернуться обратно на Землю без остановки на Арктуре, необходимо 11,4 года. Полученный результат согласуется с вычислениями близнеца *А*.

И снова возникает кажущийся парадокс. Дело в том, что наблюдения близнеца *В* покажут, что близнец *А*, остававшийся на Земле, тоже жил 11,4 года. Действительно, если космонавт взглянет на Землю, то он увидит, что земные часы идут медленнее, чем его часы. Казалось бы, близнец *А* в конце путешествия окажется моложе *В*, что противоречит предыдущим расчетам. В самом деле, если скорость действительно относительна, то как вообще можно придти к асимметричному результату? Разве из симметрии задачи не следует, что оба брата должны остаться в одном и том же возрасте?

Но этот парадокс, который якобы указывает на противоречия в теории относительности Эйнштейна, устраняется, если мы сообразим, что фактически данная ситуация с близнецами *не* симметрична по своей природе. Близнец *А* на Земле все время находится в покое в *одной и той же* инерциальной системе отсчета, а его путешествующий брат *В* переходит из одной системы в другую, когда он поворачивает в обратную сторону у Арктура, возвращаясь назад на Землю. При этом ему приходилось двигаться с замедлением, когда он достиг Арктура, а потом с ускорением, когда он после мгновенной остановки с прежней скоростью возвращается назад. Учет данного обстоятельства все ставит на свои места и полностью снимает парадокс. Однако, к сожалению, реально провести такой эксперимент с близнецами практически невозможно, т.к. столь большой скорости в 99 % от величины скорости света, которую мы предполагали для близнеца *В*, мы пока не можем достичь технически.

Аналогичные соотношения можно получить и для пространственных интервалов, измеряемых различными наблюдателями, двигающимися друг относительно друга со скоростью v. Воспользуемся преобразованиями не временной, а пространственных координат из преобразований Лоренца, который их открыл еще до появления теории относительности Эйнштейна. Из формул (6.7), (6.8), (6.9)) следует, что

$$\begin{aligned} x' &= (x - \mathrm{v}t)/(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2}, \\ y' &= y,\ z' = z, \\ t' &= (t - \mathrm{v}x/c^2)/(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2}, \end{aligned} \tag{6.11}$$

где штрихованные пространственные и временная координаты относятся к системе наблюдателя *B*, а нештрихованные к системе отсчета наблюдателя *A*. Такие же соотношения между координатами пространства-времени можно написать и для случая, когда мы считаем *B* неподвижным, а наблюдателя *A* – движущимся со скоростью – v относительно *B*, т.е.

$$x = (x' + \mathrm{v}t')/(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2},$$
$$y = y',\ z = z', \qquad (6.12)$$
$$t = (t' + \mathrm{v}x'/c^2)/(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2}.$$

Если измеряется длина некоторого стержня, то теория относительности утверждает, что результат этого измерения получится разным у наблюдателей *A* и *B*, т.к. стержень покоится в системе отсчета наблюдателя *B* и движется относительно наблюдателя *A*. Пусть у наблюдателя *B* координата начала стержня равна x'_1 и конца стержня x'_2. Тогда длина стержня вдоль оси x будет равна $x'_2 - x'_1 = l_o$. Наблюдатель *A* одновременно измеряет длину этого стержня, которая в его системе равна $x_2 - x_1 = l$. С учетом формул (6.10) и (6.11) находим:

$$x'_2 - x'_1 = (x_2 - x_1)/(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2}$$

или

$$l = l_o(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2}.$$

Таким образом, длина стержня l, измеренная наблюдателем *A*, будет меньше, чем длина этого стержня l_o, измеренная наблюдателем *B*. Полученное сокращение размеров было, как уже говорилось, известно Лоренцу до создания теории относительности из электродинамики Максвелла. Лоренц считал его результатом действия электромагнитных сил, но Эйнштейн показал, что это просто следствие принципа относительности.

Точно так же можно показать, что в теории относительности закон сложения скоростей таков, что суммарная скорость не может оказаться больше скорости света.

Вся механика Ньютона поэтому должна быть пересмотрена, но мы рассмотрим только два вопроса: релятивистский закон сложения скоростей и связь между энергией и массой.

Для рассмотрения первого вопроса введем три инерциальные системы отсчета: *A, B* и *C*. Пусть система *B* имеет скорость v относительно системы A, а система C скорость w относительно системы B. Выберем нештрихованные координаты для системы A – x, y, z, t. Один раз штрихованные – x', y', z', t' – для системы B и два раза штрихованные для системы C – x'', y'', z'', t''. Тогда релятивистские преобразования, связывающие систему B с A, имеют вид:

$$x' = (x - \mathrm{v}t)/(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2},$$

$$t' = (t - \mathrm{v}x/c^2)//(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2},$$

а преобразования, связывающие систему C с B, будут:

$$x'' = (x' - wt')/(1 - w^2/c^2)^{1/2},$$

$$t'' = (t' - wx'/c^2)/(1 - w^2/c^2)^{1/2}.$$

Подставляя первые преобразования во вторые после простых вычислений, получим:

$$x'' = (x - ut)/(1 - u^2/c^2)^{1/2},$$

$$t''= (t - ux/c^2)/(1 - u^2/c)^{1/2},$$

где мы видим, что связь между первой системой A (нештрихованной) и третьей системой C (дважды штрихованной) такая же, как и первые две, и поэтому u есть скорость третьей системы C относительно первой системы A, которая, как легко видеть, равна:

$$u = (\mathrm{v} + w)/(1 + \mathrm{v}w/c^2). \qquad (6.13)$$

Данное соотношение и является законом сложения скоростей в теории относительности Эйнштейна. Из (6.13) следует, что суммарная скорость u не равна просто сумме складываемых скоростей v и w, а меньше ее, так как делится на величину, большую единицы. Если одна из слагаемых скоростей является скоростью света c, то суммарная скорость все равно равна скорости света; она также равна скорости света, когда обе складываемые скорости равны c.

Приведем без вывода формулу для кинетической энергии частицы с массой m и скоростью v. В механике Ньютона она равнялась

$$E_{кин} = m\mathrm{v}^2/2,$$

а в механике специальной теории относительности полная энергия тела, двигающегося со скоростью v, имеет вид:

$$E = m_o c^2/(1 - v^2/c^2)^{1/2}.$$

Следовательно, при v = 0 тела обладают так называемой энергией покоя

$$E_o = m_o c^2, \qquad (6.14)$$

величину m_o называют массой покоя. Кинетическая энергия равна разности между полной энергией и энергией покоя:

$$E_{кин} = E - E_o = m_o c^2/(1 - v^2/c^2)^{1/2} - m_o c^2.$$

При достаточно малых значениях отношения v/*c* после разложения корня в ряд по степеням этого отношения и удержания первых двух членов разложения мы получаем классическую формулу:

$$E_{кин} = m_o\, v^2/2.$$

Первая точная количественная проверка соотношения (6.14), полученного теоретически Эйнштейном, была проведена в опытах Резерфорда по расщеплению атомного ядра лития ядрами атома водорода, т.е. протонами. Приведем точный расчет этой реакции, уравнение которой имеет вид: ${}_1H^1 + {}_2Li^7 \rightarrow 2\,{}_2He^4$ + *кинетическая энергия атомных ядер* ${}_2He^4$.

Масса в а.е.м. в левой части этого уравнения равняется

$$1{,}00758 + 7{,}0165 = 8{,}02408,$$

масса в правой части уравнения от двух атомных ядер гелия составляет:

$$2 \times 4{,}00280 = 8{,}00560.$$

Таким образом, в результате реакции произошла потеря массы величиной 0,01848 а.е.м., далее были определены скорости двух разлетевшихся альфа-частиц и вычислена их кинетическая энергия. Она оказалась эквивалентной потерянной массе в полном соответствии с формулой Эйнштейна (6.14).

Из выражения для нулевой энергии видна полная эквивалентность массы и энергии, что привело ко многим новым фундаментальным открытиям в физике и технике.

Итак, любой форме энергии должна отвечать своя масса $M = E/c^2$. Например, свет, обладающий энергией, должен обладать и массой. В принципе массу света можно измерить и почувствовать, используя ящик с абсолютно непрозрачными стенками, заключающий внутри себя излучение. Однако из-за большого переводного множителя c^2 изменение веса между пустым ящиком и ящиком с излучением мы не почувствуем даже при взвешивании на самых точных весах. И все же можно наблюдать эффект массы света в астрономических масштабах. Лучи света, как всякое тело, обладающее массой, должны притягиваться Солнцем, проходя мимо него. Это искривление световых лучей в направлении Солнца приводит к заметному смещению кажущихся положений звезд, наблюдаемых вблизи края Солнца во время его затмения (*рис. 84*). Кроме того, масса тела M возрастает при движении, что мы знаем из приведенных выше формул:

$$M = M_o/(1 - \mathrm{v}^2/c^2)^{1/2}, \qquad (6.15)$$

где M_o – масса покоя. В частности, из соотношения $E_o = M_o c^2$ следует, что, например, 1 кг песка обладает энергией $E_o =$ $= 1\times(3\times10^8) = 9\times10^{16}$ джоулей, но мы ее не можем никак использовать.

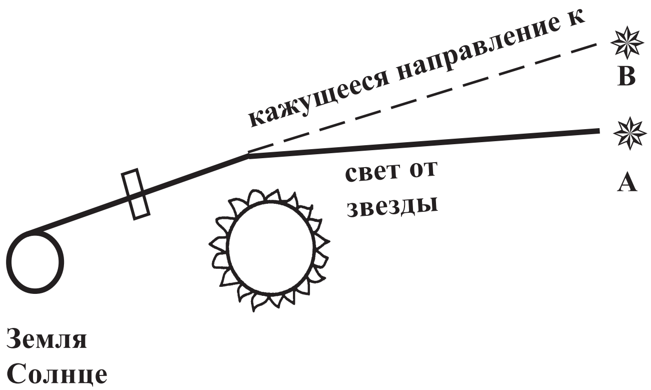


Рис. 84. *К действию тяготения на свет – отклонение луча света от звезды под действием притяжения Солнца.*

В процессах образования микрочастиц кинетическая энергия протонов в ускорителях часто превращается в массу покоя новых частиц. И наоборот, самопроизвольный распад некоторых из этих микрочастиц может привести к тому, что их масса покоя может снова превратиться в кинетическую энергию продуктов распада. Таким образом, по формуле Эйнштейна, кинетическая энергия немыслима без массы, поэтому по существу выполняется закон сохранения энергии-массы.

Полная энергия Вселенной остается постоянной, точно так же постоянна и сумма ее массы движения и массы покоя. Последняя в различных процессах может частично или полностью превращаться в кинетическую энергию и обратно, что, в частности, относится и к обоим типам нуклонов – протонам и нейтронам, т.е. нейтроны могут превращаться в протоны и обратно. Однако при всех возможных ядерных взаимодействиях полное число протонов и нейтронов сохраняется постоянным, и мы не можем использовать энергию, связанную с их массами покоя. Возможно только извлекать ограниченное количество энергии ядер атомов в таких процессах, как деление тяжелых атомных ядер или синтез легких атомных ядер, где часть массы покоя атомных ядер превращается в кинетическую энергию микрочастиц и продуктов их распада или синтеза. Эту энергию и получают в ядерных реакторах, атомных и водородных бомбах.

В заключение изложения теории относительности отметим, что немецкий ученый Г. Минковский в 1908–1909 годах разработал детально математическую модель четырехмерного пространства-времени. Еще со времен Пифагора в Греции было известно, что квадрат интервала длины в евклидовом пространстве r^2 равен сумме квадратов трех пространственных координат:

$$r^2=x^2+y^2+z^2. \tag{6.16}$$

Однако в теории относительности (6.16) не является инвариантом, т.е. неизменной величиной. Инвариантом при любых преобразованиях пространства-времени теперь является другая величина s, квадрат которой равен следующему выражению:

$$s^2=x^2+y^2+z^2-c^2t^2, \tag{6.17}$$

здесь вместо квадрата четвертой временной координаты в соответствии с требованиями размерности стоит мнимая величина ict , где i – мнимая единица (ее квадрат равен – 1), поэтому $(ict)^2 = -c^2t^2$.

Из приведенных *рис. 85* и *рис. 86* можно сравнить диаграммы пространства-времени для ньютоновской механики и по Минковскому. Горизонтальные срезы на *рис. 85* изображают на плоскости x все трехмерное пространство Ньютона в данный момент времени t. События, изображаемые точками A и B на этой же диаграмме, по механике Ньютона являются одновременными, т.е. происходящими в данный момент, но в разных точках пространства. Поэтому такие срезы на ньютоновской диаграмме одинаковы для всех инерциальных систем, т.е. наблюдателей, двигающихся друг относительно друга с постоянной по величине и направлению скоростью v. На *рис. 86* по Минковскому для ict и x выбраны одинаковые единицы измерения: сантиметры и временные «сантиметры». Там же нанесены линии, проходящие под углом в 45° к вертикали через точку P данного события с пространственной координатой x и временной ict. Для другого инерционного наблюдателя надо провести другие линии в другой точке x' под углом 45° к вертикали.

Линии под углом 45° к вертикали – это линии, по которым от наблюдателя распространяется свет со скоростью c. При выбранном масштабе, действительно, все, что движется со скоростью света, будет в трех измерениях двигаться по поверхности конуса с раствором угла в 45°, а сам конус поэтому называется *световым конусом*. Скорость света – инвариант в теории относительности, и вместе с тем, предельная скорость, вследствие чего мировые линии всех движений со скоростями, не превышающими скорости света, будут лежать внутри светового конуса.

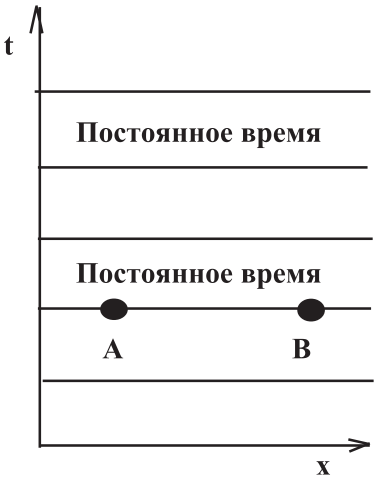
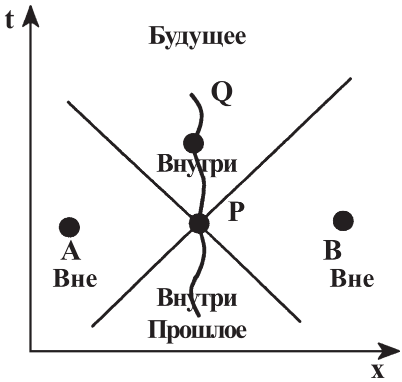


Рис. 85. *Диаграмма пространства-времени в ньютоновской механике.*

Рис. 86. *Диаграмма пространства-времени по Минковскому.*



Итак, пространство-время Минковского делится на две области: «внутри» и «вне» двух линий. Все допустимые мировые линии материальной точки, двигающейся со скоростью не большей c, всегда лежат внутри светового конуса, так как вне его любая мировая линия соответствует точке, двигающейся с запрещенной скоростью, большей скорости света. «Низ» раствора светового конуса относится по времени к прошлому, а «верх» – к будущему. Вся область пространства-времени «вне» светового конуса недоступна для движения любых частиц.