

Тема 5: Специальная теория относительности (релятивистская механика)

Специальной теорией относительности (СТО) или *релятивистской механикой* называется раздел физики, изучающий закономерности движения макроскопических тел, скорости которых близки к скорости света в вакууме (то есть $v \approx c$, где $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$).

Наряду с квантовой механикой, СТО служит теоретической базой современной физики и техники. СТО часто называют *релятивистской теорией*, а специфические явления, описываемые этой теорией, – *релятивистскими эффектами*. Эти эффекты наиболее отчетливо проявляются при скоростях движения тел, близких к скорости света в вакууме $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с. Специальная теория относительности была создана А. Эйнштейном в 1905 г.

В классической механике были сформулированы основные представления о пространстве, времени и движении:

1. пространство является бесконечным, однородным (то есть все точки пространства совершенно одинаковы), изотропным (то есть все свойства пространства одинаковы по всем направлениям) и свойства пространства не зависят от находящихся в нём тел,
2. время является однородным (то есть все моменты времени совершенно одинаковы), течёт только в одном направлении (от прошлого к будущему) и течение времени не зависит от состояния движущихся тел.

Однако к концу 19 века накопился ряд теоретических и опытных данных, свидетельствующих о том, что классические представления о пространстве и времени требуют пересмотра. Исключительно важную роль в развитии этих представлений с теоретической точки зрения сыграла электромагнитная теория Максвелла. Предсказанные теорией Максвелла *электромагнитные волны*, распространяющиеся с конечной скоростью, уже нашли практическое применение – в 1895 году было изобретено радио русским учёным А. С. Поповым. Из теории Максвелла следовал неожиданный вывод, что скорость распространения электромагнитных волн в любой инерциальной системе отсчета имеет одно и то же значение, равное скорости света в вакууме.

Наиболее существенное расхождение классической механики с экспериментом было впервые зафиксировано в опытах Альберта Майкельсона и Эдуарда Морли, которые они провели в 1881 г. В опытах сравнивались скорость распространения света вдоль направления орбитальной скорости Земли вокруг Солнца и перпендикулярном этому направлению. Согласно классической механике скорость света в направлении движения Земли должна быть равна $v_1 = c + v$, а в перпендикулярном направлении $v_2 = c$, то есть $v_1 \neq v_2$. Но, несмотря на то, что скорость орбитального движения Земли вокруг Солнца равна

$30 \frac{км}{с}$, скорости света в обоих направлениях оказались равны скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$, то есть $v_1 = v_2$,

что противоречило классической механике.

Равными оказались и скорости света от диаметрально противоположных точек Солнца. Из-за вращения Солнца одна из этих точек приближается к наблюдателю, а вторая – удаляется.

Объяснение этих необычных фактов было найдено Эйнштейном ценой отказа от классических представлений о пространстве и времени. Наиболее важным шагом на этом пути явился пересмотр используемого в классической физике понятия абсолютного времени. Классические представления, кажущиеся наглядными и очевидными в нашей обыденной жизни, в действительности оказались неверными. Многие понятия и величины, которые в нерелятивистской физике считались абсолютными, то есть не зависящими от системы отсчета, на самом деле оказались относительными.

В основе специальной теории относительности лежат два принципа или постулата, сформулированные Эйнштейном: 1. **Принцип относительности:** *все законы природы протекают совершенно одинаково (то есть описываются одними и теми же математическими уравнениями) во всех инерциальных системах отсчета* (то есть инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой).

Это означает, что во всех инерциальных системах отсчета все физические законы (не только механические) выполняются совершенно одинаково и описываются одинаковыми уравнениями. Таким образом, принцип относительности классической механики обобщается на все процессы природы, в том числе и на электромагнитные. Этот обобщенный принцип называют *принципом относительности Эйнштейна*.

Любая система отсчета, которая движется относительно инерциальной системы отсчета равномерно и прямолинейно, так же является инерциальной. Инерциальные системы отсчета ничем не отличаются друг от друга, они полностью физически тождественны, и какие бы физические опыты не были поставлены в данной инерциальной системе отсчета, они дадут совершенно такие же результаты в любой другой инерциальной системе отсчета.

Не существует абсолютно покоящейся инерциальной системы отсчета или абсолютно равномерно движущейся, речь может идти только о движении и покое относительно другой инерциальной системы отсчета.

Это означает, что все инерциальные системы отсчета равноправны (или эквивалентны). Невозможно выделить предпочтительную абсолютную инерциальную систему отсчета.

1. **Принцип постоянства скорости света:** *скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя, одинакова во всех инерциальных системах отсчета и является предельной скоростью движения тел и распространения взаимодействий в природе.*

Скорость света в СТО занимает особое положение. Это предельная скорость передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую. Постоянство скорости света является фундаментальным свойством природы.

Скорость света – максимально возможная скорость движения любого тела и распространения любого сигнала в природе.

Принципы относительности Эйнштейна не выводятся из каких-либо других, а являются следствием обобщения всей совокупности опытных данных. Следствия из теории, созданной на основе этих принципов, подтверждались многочисленными опытными проверками, в частности при изучении движения быстрых частиц в ускорителях, атомных процессах, ядерных реакций и т. п.

Постулаты СТО находятся в явном противоречии с классическими представлениями, к которым мы привыкли в обычной жизни. Согласно классической механике время едино для всех наблюдателей во всех системах отсчета.

В обычных масштабах времени и пространства мы пренебрегаем временем прохождения светового сигнала от одного места в другое. Однако при скоростях сравнимых со скоростью света этот эффект становится весьма существенным.

Рассмотрим такой пример: пусть в момент времени $t = 0$, когда координатные оси двух инерциальных систем отсчета K и K' совпадают, в общем начале координат произошла кратковременная вспышка света. За время t системы сместятся относительно друг друга на расстояние vt , а сферический волновой фронт в каждой системе будет иметь радиус ct (см. рис. 1), так как системы равноправны и в каждой из них скорость света равна c .

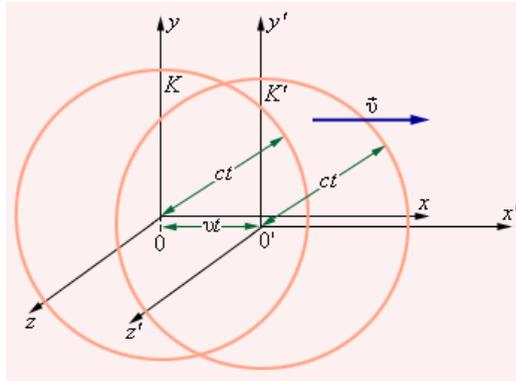


Рис. 1.

Кажущееся противоречие постулатов СТО.

С точки зрения наблюдателя в системе K центр сферы находится в точке O , а с точки зрения наблюдателя в системе K' он будет находиться в точке O' . Следовательно, центр сферического фронта одновременно находится в двух разных точках! Получается явный абсурд.

Причина возникающего недоразумения лежит не в противоречии между двумя принципами СТО, а в допущении, что положение фронтов сферических волн для обеих систем относятся к **одному и тому же моменту времени**. Это допущение заключено в формулах преобразования Галилея, согласно которым время в обеих системах течет одинаково: $t = t'$.

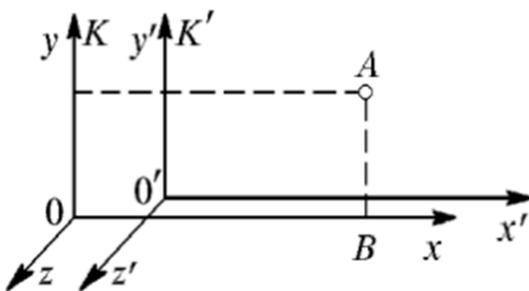
Время в неподвижной системе отсчета и движущейся относительно неё течет с разной скоростью.

Замедление времени – это свойство самого времени. При движении тела замедляются все физические процессы, в том числе и химические реакции.

Следовательно, постулаты Эйнштейна находятся в противоречии не друг с другом, а с формулами преобразования Галилея. Поэтому на смену классических преобразований Галилея, релятивистская механика предложила другие формулы преобразования при переходе из одной инерциальной системы в другую – так называемые, **преобразования Лоренца**, которые при скоростях движения близких к скорости света, позволяют объяснить все релятивистские эффекты, а при малых скоростях ($v \ll c$) переходят в формулы преобразования Галилея.

Кинематические формулы преобразования координат и времени в СТО были получены Лоренцем в 1904 году еще до появления СТО. Если относительно преобразований Галилея инвариантными были только уравнения механики, то относительно преобразований Лоренца инвариантными оставались и уравнения кинематики и уравнения электродинамики.

Для случая, когда система K' движется относительно K со скоростью v вдоль оси x , преобразования Лоренца имеют следующий вид:



$$\begin{array}{l}
 K' \rightarrow K \\
 \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 K \rightarrow K' \\
 \left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.
 \end{array}$$

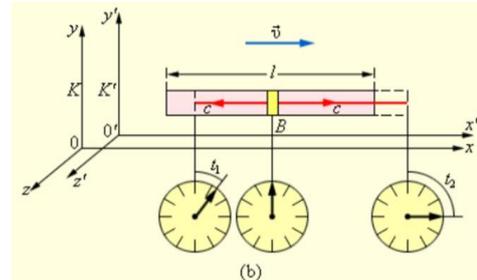
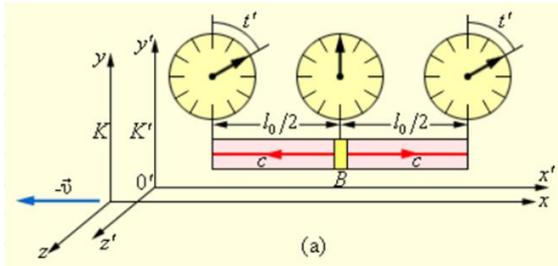
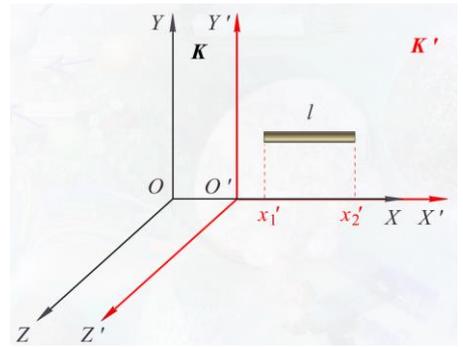
$\beta = v / c.$

Таким образом, новая теория относительности не отвергала старую классическую механику Ньютона, а только уточняла пределы её применимости. Такая взаимосвязь между старой и новой, более общей теорией, включающей старую теорию как предельный случай, носит название **принципа соответствия**.

Конечное значение скорости света приводит к необычным следствиям, которые в нашей повседневной жизни, протекающей при скоростях во много раз меньших скорости света, не проявляются.

Для примера давайте рассмотрим следующий мысленный эксперимент (*мысленными экспериментами* называют опыты, результаты которых ясны, а воспроизвести такой опыт иногда технически невозможно), показывающий к чему приводит второй постулат теории относительности.

Пусть в системе отсчета K' вдоль оси x' неподвижно расположен длинный жесткий стержень. В центре стержня находится импульсная лампа B , а на его концах установлены двое **синхронизованных часов** (рис. 2 а). Система K' движется вдоль оси x системы K со скоростью v . В некоторый момент времени лампа посылает короткие световые импульсы в направлении концов стержня. В силу равноправия обоих направлений свет в системе K' дойдет до концов стержня одновременно, и часы, закрепленные на концах стержня, покажут одно и то же время t' . Относительно системы K концы стержня движутся со скоростью v так, что один конец движется навстречу световому импульсу, а другой концу свету приходится догонять. Так как скорости распространения световых импульсов в обоих направлениях одинаковы и равны c , то, с точки зрения наблюдателя в системе K , свет раньше дойдет до левого конца стержня, чем до правого (рис. 2 б).



Относительность одновременности. Световой импульс достигает концов твердого стержня одновременно в системе отсчета K' (а) и не одновременно в системе отсчета K (б).

Рис. 2

Этот эксперимент свидетельствует о том, что само понятие одновременности становится относительным, то есть зависящим от системы отсчета: **два события одновременные в одной системе отсчета, могут оказаться неодновременными в другой системе отсчета.**

Таким образом, порядок следования событий может зависеть от выбора системы отсчета.

Если как следует подумать об этом, то мы должны прийти к выводу об относительности течения времени, то есть в разных системах отсчета время может течь по-разному.

Рассмотрим ещё один мысленный эксперимент:

Пусть оба события в системе K' происходят в одной и той же точке и промежуток времени между ними равен τ_0 по часам движущейся системы отсчета K' . Этот промежуток времени называется **собственным временем**. Каким будет промежуток времени между этими же событиями, если его измерить по часам неподвижной системы K ?

Для ответа на этот вопрос рассмотрим следующий мысленный эксперимент. На одном конце твердого стержня некоторой длины l расположена импульсная лампа B , а на другом конце – отражающее зеркало M . Стержень расположен, неподвижно в системе K' и ориентирован параллельно оси y' (рис. 4.2.2). Событие 1 – вспышка лампы, событие 2 – возвращение короткого светового импульса к лампе.

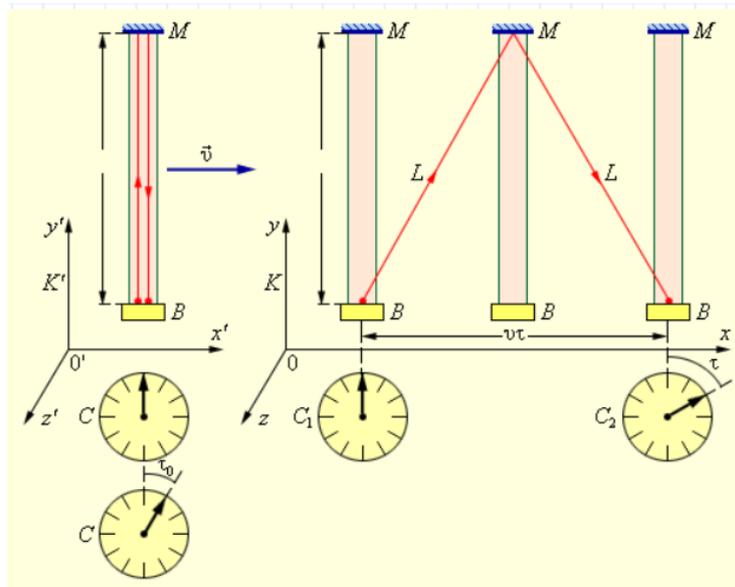


Рисунок 4.2.2.

Относительность промежутков времени. Моменты наступлений событий в системе K' фиксируются по одним и тем же часам C , а в системе K – по двум синхронизованным пространственно-разнесенным часам C_1 и C_2 . Система K' движется со скоростью v в положительном направлении оси x системы K .

В системе K' оба рассматриваемых события происходят в одной и той же точке. Промежуток времени между ними (*собственное время*) равен $\tau = 2l / c$. С точки зрения наблюдателя, находящегося в системе K , световой импульс движется

между зеркалами зигзагообразно и проходит путь $2L$, равный $2L = 2\sqrt{l^2 + \left(\frac{v\tau}{2}\right)^2}$,

где τ – промежуток времени между отправлением светового импульса и его возвращением, измеренный по синхронизованным часам C_1 и C_2 , расположенными в разных точках системы K .

Но согласно второму постулату СТО, световой импульс двигался в системе K с той же скоростью c , что и в системе K' . Следовательно, $\tau = 2L / c$.

Из этих соотношений можно найти связь между τ и τ_0 : $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$, где $\beta = \frac{v}{c}$.

Таким образом, промежуток времени между двумя событиями зависит от системы отсчета, т. е. является *относительным*. Собственное время τ_0 всегда меньше, чем промежуток времени между этими же событиями, измеренный в любой другой системе отсчета. Этот эффект называют *релятивистским замедлением времени*. Замедление времени является следствием инвариантности скорости света.

С релятивистским эффектом замедления времени связан так называемый «*парадокс близнецов*». Предполагается, что один из близнецов остается на Земле, а второй отправляется в длительное космическое путешествие с субсветовой скоростью. С точки зрения земного наблюдателя, время в космическом корабле течет медленнее, и когда астронавт возвратится на Землю, он окажется гораздо моложе своего брата-близнеца, оставшегося на Земле. Парадокс заключается в том, что подобное заключение может сделать и второй из близнецов, отправляющийся в космическое путешествие. Для него медленнее течет время на Земле, и он может ожидать, что по возвращению после длительного путешествия на Землю он обнаружит, что его брат-близнец, оставшийся на Земле, гораздо моложе его.

Чтобы разрешить «парадокс близнецов», следует принять во внимание неравноправие систем отсчета, в которых находятся оба брата-близнеца. Первый из них, оставшийся на Земле, все время находится в инерциальной системе отсчета, тогда как система отсчета, связанная с космическим кораблем, принципиально неинерциальная. Космический корабль испытывает ускорения при разгоне во время старта, при изменении направления движения в дальнейшей точке траектории и при торможении перед посадкой на Землю. Поэтому заключение брата-астронавта неверно. СТО предсказывает, что при возвращении на Землю он действительно окажется моложе своего брата, оставшегося на Земле.

Эффекты замедления времени пренебрежимо малы, если скорость космического корабля гораздо меньше скорости света c . Тем не менее, удалось получить прямое подтверждение этого эффекта в экспериментах с макроскопическими часами. Наиболее точные часы – это атомные часы на пучке атомов цезия. Эти часы «тикают» 9192631770 раз в секунду. Американские физики в 1971 году провели сравнение двух таких часов, причем одни из них находились в полете вокруг Земли на обычных реактивных лайнерах, а другие оставались на Земле в военно-морской обсерватории США. В соответствии с предсказаниями СТО, путешествующие на лайнерах часы должны были отстать от находящихся на Земле часов на $(184 \pm 23) \cdot 10^{-9}$ с. Наблюдаемое отставание составило $(203 \pm 10) \cdot 10^{-9}$ с, т. е. в пределах ошибок измерений. Через несколько лет эксперимент был повторен и дал результат, согласующийся со СТО с точностью 1 %.

Следствия из преобразований Лоренца

Из преобразований Лоренца вытекает целый ряд необычных для нашей жизни следствий. В частности, из них следует *релятивистский эффект замедления времени* и *лоренцево сокращение длины*.

Эффект замедления времени

Пусть, например, в некоторой точке x' системы K' происходит процесс длительностью $\tau_0 = t'_2 - t'_1$ (собственное время), где t'_1 и t'_2 – показания часов в K' в начале и конце процесса. Длительность τ этого процесса в системе K будет равна

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{t'_2 + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{t'_1 + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Таким образом,

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где τ_0 - промежуток времени между двумя событиями, измеренными часами, движущимися вместе с телом,

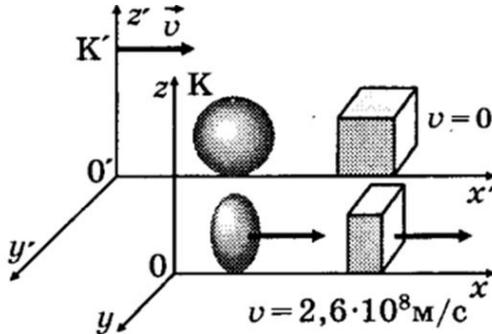
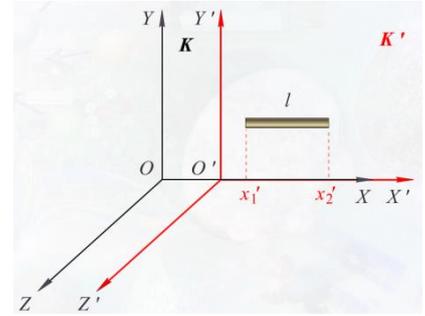
τ - промежуток времени между двумя событиями, измеренными часами, в неподвижной системе отсчета.

Лоренцево сокращение длины

Аналогичным образом, можно показать, что из преобразований Лоренца вытекает релятивистское сокращение длины:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = l_0 \sqrt{1 - \beta^2},$$

где l_0 - длина стержня, измеренная в системе отсчёта, относительно которой он покоится (так называемая, *собственная длина*) l - длина стержня, измеренная в системе отсчёта, относительно которой он движется со скоростью v .



Таким образом, длина стержня зависит от системы отсчета, в которой она измеряется, т. е. является относительной величиной. Длина стержня оказывается наибольшей в той системе отсчета, в которой стержень покоится. Движущиеся относительно наблюдателя тела сокращаются в направлении своего движения. Этот релятивистский эффект носит название *лоренцево сокращения длины*.

Следует отметить, что размеры тела сокращаются только в направлении его движения, поперечные размеры тела при движении не изменяются.

Ещё одним необычным следствием из преобразований Лоренца является вывод об *относительности одновременности*.

Пусть, например, в двух разных точках системы отсчета K' ($x'_1 \neq x'_2$) *одновременно* с точки зрения наблюдателя в K' ($t'_1 = t'_2 = t'$) происходят два события. Согласно преобразованиям Лоренца, наблюдатель в системе K будет иметь

$$x_1 = \frac{x'_1 + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad x_2 = \frac{x'_2 + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow x_1 \neq x_2$$

$$t_1 = \frac{t' + \frac{vx'_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad t_2 = \frac{t' + \frac{vx'_2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow t_1 \neq t_2$$

Следовательно, в системе K эти события, *оставаясь пространственно разобщенными*, оказываются *неодновременными*.

Более того, знак разности $t_2 - t_1$ определяется знаком выражения $v(x'_2 - x'_1)$, поэтому в одних системах отсчета первое событие может предшествовать второму, в то время как в других системах отсчета, наоборот, второе событие предшествует первому. Этот вывод СТО *не относится* к событиям, связанным *причинно-следственными связями*, когда одно из событий является физическим следствием другого. Можно показать, что в СТО не нарушается *принцип причинности*, и порядок следования причинно-следственных событий одинаков во всех инерциальных системах отсчета.

Релятивистская динамика

Опыт показывает, что при скоростях тел близких к скорости света, некоторые физические величины, такие, например, как импульс и кинетическая энергия, должны рассчитываться по другим формулам. Иначе расчёты, проведённые для элементарных частиц, движущихся в современных ускорителях со скоростями близкими к скорости света в вакууме по формулам классической механики, дают неверные результаты. Кроме того уравнения классической механики не удовлетворяют преобразованиям Лоренца. Поэтому кинетическую энергию релятивистской частицы необходимо определять

по формуле:

$$T = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2.$$

Эйнштейн интерпретировал первое слагаемое в правой части этого выражения как *полную энергию* движущейся частицы E , а второй член как *энергию покоя* E_0 , то есть

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{и} \quad E_0 = mc^2.$$

Таким образом, кинетическая энергия T в релятивистской механике определяется как разность между полной энергией частицы E и его энергией покоя E_0 , то есть

$$T = E - E_0.$$

Аналогично, вместо классического импульса $\vec{p} = m\vec{v}$ в СТО **релятивистский импульс** \vec{p} тела с массой m , движущегося

со скоростью \vec{v} должен определяться по формуле:
$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Если принять такое определение, то закон сохранения суммарного импульса взаимодействующих частиц (например, при их столкновениях в ускорителях) будет выполняться во всех инерциальных системах, при использовании преобразований Лоренца.

При $\beta \rightarrow 0$ формула релятивистского импульса переходит в формулу для классического импульса $\vec{p} = m\vec{v}$.

Следует так же отметить, что во многих учебниках прошлых лет было принято различать так называемую **массу покоя** m_0 и **релятивистскую массу** m частицы, которая зависела якобы от скорости её движения и определялась по формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$
 Из неё следует, что чем выше скорость частицы, тем больше её релятивистская масса. Современная

физика отказалась от этих представлений и считает, что масса m есть такая же фундаментальная характеристика частицы, как и её заряд и не зависит от скорости её движения.

Кроме того, связь между массой, импульсом и полной энергией частицы в релятивистской механике имеет вид:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2.$$

Это уравнение также оказывается **инвариантным** (то есть не зависящим от выбранной инерциальной системы отсчёта) относительно преобразований Лоренца.

Основное уравнение релятивистской динамики

В теории относительности **основное уравнение релятивистской динамики** материальной точки записывается так же, как и

второй закон Ньютона:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt},$$

однако под \vec{p} необходимо понимать релятивистский импульс частицы, то есть
$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right).$$

Закон взаимосвязи массы и энергии

Закон взаимосвязи массы и энергии является одним из самых важных выводов СТО. Формула для расчёта энергии покоя частицы $E_0 = mc^2$ свидетельствует о том, что понятия масса и энергия являются взаимосвязанными и представляют собой лишь различные свойства материи. Масса тела характеризует его инертность, а также способность тела вступать в гравитационное взаимодействие с другими телами. Важнейшим свойством энергии является её способность превращаться из одной формы энергии в другую в эквивалентных количествах при различных физических процессах – в этом заключается содержание закона сохранения энергии.

Пропорциональность массы и энергии является выражением внутренней сущности материи. Формула Эйнштейна $E = mc^2$

выражает фундаментальный закон природы, который называется **законом взаимосвязи массы и энергии**.

Из него в частности следует, что вещество имеет массу и, следовательно, обладает энергией. В тоже время любое физическое поле имеет энергию и, следовательно, обладает определённой массой.

Классическая механика разделяет два вида материи: **вещество** и **поле**.

Необходимым атрибутом вещества является масса, а поля – энергия.

Соответственно, в классической механике существуют два закона сохранения:

- закон сохранения массы,
- закон сохранения энергии

Согласно **закону взаимосвязи массы и энергии** нет существенного различия между массой и энергией, то есть существует один **закон сохранения массы-энергии**.

Из него следует, что изменение энергии тела на величину ΔE , влечёт за собой пропорциональное изменение массы:

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

То есть раскаленное тело имеет большую массу, чем холодное. Однако диапазону изменения энергии в этом случае соответствует настолько малое изменение массы ($\Delta m \approx 10^{-17}$ кг), что её обнаружить не удастся.

Этот закон подтверждается в атомной физике и является основой при расчётах ядерных реакций. В частности из этого закона следует, что Солнце только за счёт своего электромагнитного излучения худеет на 4 млн. тонн каждую секунду.

Достаточно сказать, что только благодаря существованию закона взаимосвязи массы и энергии происходит выделение энергии при термоядерных реакциях, которые являются источником энергии излучения звёзд. Если бы этот закон в природе не выполнялся, то мы с Вами сейчас не разговаривали бы, так как на Солнце не происходили бы термоядерные реакции и никакой жизни на Земле не было бы.