

Лекция 1

Теория относительности.

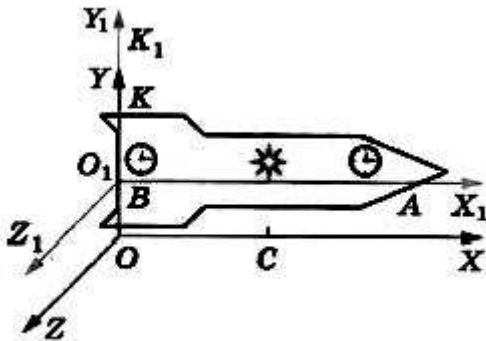
ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

До начала XX в. никто не сомневался, что время абсолютно. Два события, одновременные для жителей Земли, одновременны для жителей любой космической цивилизации. Создание теории относительности привело к выводу о том, что это не так. Причиной несостоятельности классических представлений о пространстве и времени является неправильное предположение о возможности мгновенной передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую. Существование предельной конечной скорости передачи взаимодействий вызывает необходимость глубокого изменения привычных представлений о пространстве и времени, основанных на повседневном опыте. Представление об абсолютном времени, которое течет раз и навсегда заданным темпом совершенно независимо от материи и ее движения, оказывается неправильным.

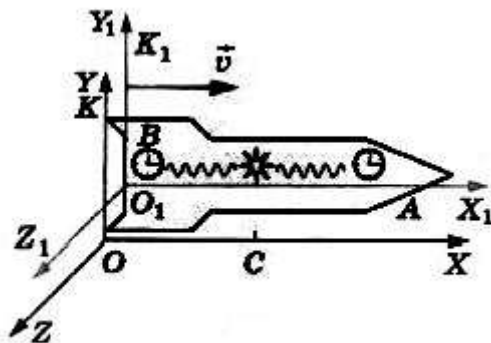
Если допустить возможность мгновенного распространения сигналов, то утверждение, что события в двух пространственно разделенных точках А и В произошли одновременно, будет иметь абсолютный смысл. Можно поместить в точки А и В часы и синхронизировать их с помощью мгновенных сигналов. Если такой сигнал отправлен из точки А, например, в 0 ч 45 мин и он в этот же момент времени по часам В пришел в точку В, то, значит, часы показывают одинаковое время, т. е. идут синхронно. Если же такого совпадения нет, то часы можно синхронизировать, подведя вперед те часы, которые показывают меньшее время в момент отправления сигнала. Любые события, например два удара молнии, одновременны, если они происходят при одинаковых показаниях синхронизированных часов. Только располагая в точках А и В синхронизированные часы, можно судить о том, произошли ли два каких-либо события в этих точках одновременно или нет. Но как можно синхронизировать часы, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, если скорость распространения сигналов не бесконечно велика? Для синхронизации часов естественно использовать световые или вообще электромагнитные сигналы, так как скорость электромагнитных волн в вакууме является строго определенной, постоянной величиной.

Именно этот способ используют для проверки часов по радио. Сигналы времени позволяют синхронизировать ваши часы с точными эталонными часами. Зная расстояние от радиостанции до дома, можно вычислить поправку на запаздывание сигнала. Эта поправка, конечно, очень мала. В повседневной жизни она не играет сколько-нибудь заметной роли. Но при огромных космических расстояниях она может оказаться весьма существенной.

Рассмотрим подробнее простой метод синхронизации часов, не требующий никаких вычислений. Допустим, что космонавт хочет узнать, одинаково ли идут часы А и В, установленные на противоположных концах космического корабля. Для этого с помощью источника, неподвижного относительно корабля и расположенного в его середине, космонавт производит вспышку света. Свет одновременно достигает тех и других часов. Если показания часов в этот момент одинаковы, то часы идут синхронно. Но так будет лишь в системе отсчета K_1 , связанной с кораблем. В системе же отсчета K , относительно которой корабль движется, положение иное. Часы на носу корабля удаляются от того места, где произошла вспышка света источника (точка с координатой O), и, чтобы достигнуть часов А, свет должен преодолеть расстояние, большее половины длины корабля. Напротив, часы В на корме приближаются к месту вспышки, и путь светового сигнала меньше половины длины корабля. На рисунке координаты x и x_1 совпадают в момент вспышки.



На нижеприведенном рисунке показано положение систем отсчета в момент, когда свет достигает часов В.



Поэтому наблюдатель, находящийся в системе K , сделает вывод: сигналы достигают тех и других часов не одновременно. Два любых события в точках А и В, одновременные в системе отсчета K_1 , неодновременны в системе K . Но согласно принципу относительности системы K_1 и K совершенно равноправны. Ни одной из этих систем отсчета нельзя отдать предпочтение,

поэтому мы вынуждены прийти к заключению: одновременность пространственно разделенных событий относительна. Причиной относительности одновременности является, как мы видим, конечность скорости распространения сигналов. Именно в относительности одновременности кроется решение парадокса со сферическими световыми сигналами, о котором шла речь в предыдущей теме. Свет одновременно достигает точек сферической поверхности с центром в точке O только с точки зрения наблюдателя, находящегося в покое относительно системы K . С точки же зрения наблюдателя, связанного с системой K_1 , свет достигает этих точек в разные моменты времени. Разумеется, справедливо и обратное: с точки зрения наблюдателя в системе отсчета K свет достигает точек поверхности сферы с центром в точке O_1 в различные моменты времени, а не одновременно, как это представляется наблюдателю в системе отсчета K_1 . Вывод: никакого парадокса в действительности нет. Итак, одновременность событий относительна. Представить это наглядно невозможно из-за того, что скорость света много больше тех скоростей, с которыми привыкли двигаться мы.

Постулаты теории относительности

Специальная теория относительности

Первый постулат СТО — *расширенный принцип относительности*. Он уравнивал между собой не только инерциальные системы, движущиеся равномерно и прямолинейно друг относительно друга, но и распространил действие принципа на законы электродинамики.

Все физические явления протекают одинаковым образом во всех инерциальных системах отсчета; все законы природы и уравнения, их описывающие, инвариантны, т. е. не меняются, при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

Второй постулат утверждает, что скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО. Таким образом, скорость света занимает особое положение в природе. В отличие от всех других скоростей, меняющихся при переходе от одной системы отсчета к другой, скорость света в пустоте является инвариантной величиной.

Скорость света в вакууме не зависит от движения источника света и одинакова во всех направлениях.

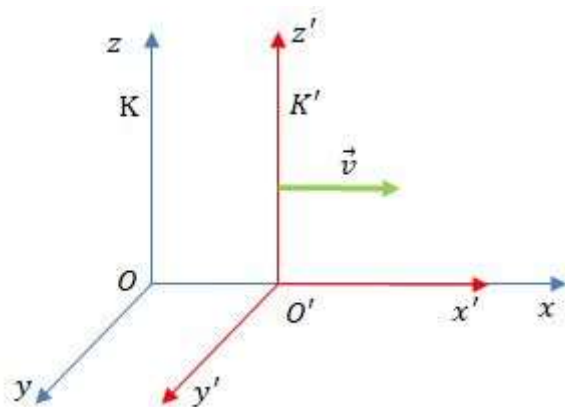
Следствия:

1) скорость света в вакууме является *предельной*: никакой сигнал, никакое воздействие одного тела на другое не могут распространяться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме.

2) значение предельной скорости - скорости света в вакууме - должно быть одинаково во всех инерциальных системах отсчета: в противном случае эти системы можно было бы отличить друг от друга.

Преобразования Лоренца

Кинематические формулы преобразования координат и времени в СТО называются *преобразованиями Лоренца*. Они были предложены в 1904 году еще до появления СТО как преобразования, относительно которых инвариантны уравнения электродинамики. Для случая, когда система K' движется относительно K со скоростью v вдоль оси x , преобразования Лоренца имеют вид:



Прямые преобразования		Обратные преобразования	
Галилея	Лоренца	Галилея	Лоренца
$x' = x - vt$	$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	$x = x' + vt'$	$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
$y' = y$	$y' = y$	$y = y'$	$y = y'$
$z' = z$	$z' = z$	$z = z'$	$z = z'$
$t' = t$	$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	$t = t'$	$t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

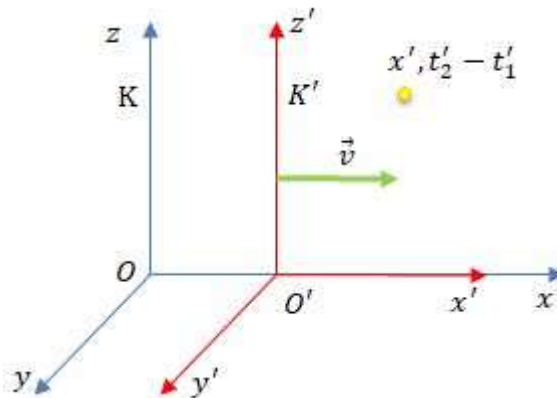
Следствия:

1) релятивистский 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 системе K' в начале и конце процесса. Длительность τ этого процесса в системе K будет равна

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

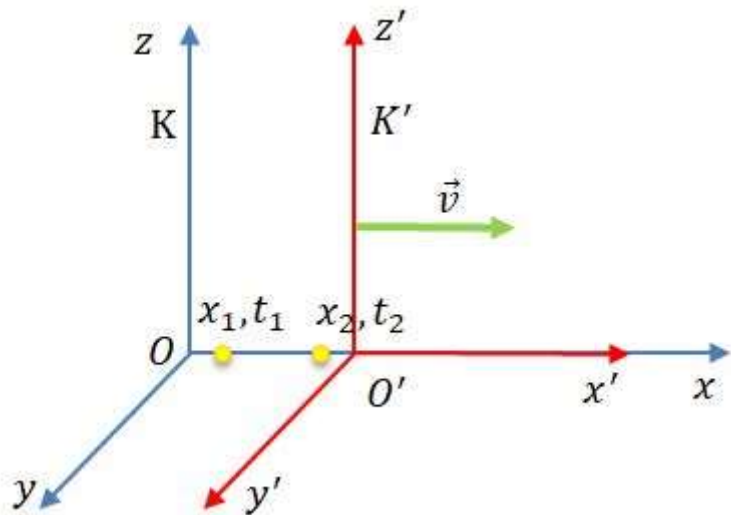
$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



2) относительность 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

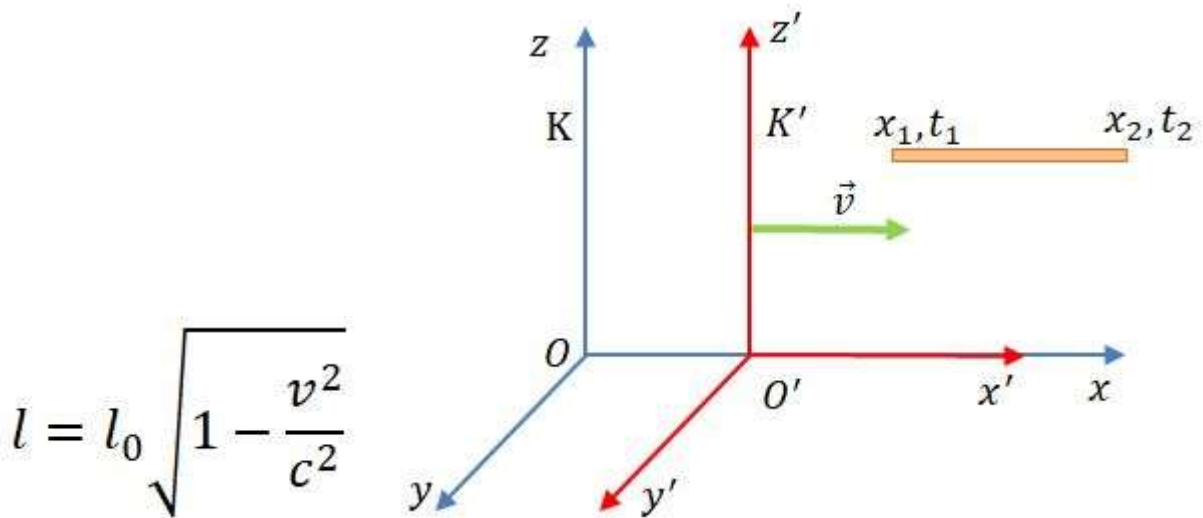
$$\Delta t' = \frac{(x_1 - x_2) \frac{v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \neq 0$$



3) сокращение длины

Разность между координатами конца и начала отрезка в системе отсчета, в которой он неподвижен, называется *собственной длиной отрезка*. В нашем случае $l_0 = x'_2 - x'_1$, где x'_2 – координата конца отрезка в системе K' и x'_1 – координата начала. Относительно системы K стержень движется. Длиной

движущегося стержня принимают разность между координатами конца и начала стержня в один и тот же момент времени по часам системы k.



или в общем виде

$$v_{отн} = \frac{u + v}{1 + \frac{u \cdot v}{c^2}}$$

ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ

С новыми пространственно-временными представлениями не согласуются при больших скоростях движения и законы механики Ньютона. Лишь при малых скоростях движения, когда справедливы классические представления о пространстве и времени, второй закон Ньютона (уравнение движения)

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F}$$

не меняет своей формы при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой (выполняется принцип относительности).

Но при больших скоростях движения этот закон в своей обычной (классической) форме несправедлив. Однако введенные в динамике основные понятия: энергия, импульс — имеют тот же физический смысл, лишь понятие массы в классической механике отличается от понятия массы в релятивистской динамике. В природе существуют частицы, скорость которых

равна скорости света. Это фотоны и различного типа нейтрино. Масса этих частиц равна нулю. Они не могут быть замедлены или ускорены. Поэтому во всех инерциальных системах отсчета их импульс и энергия не равны нулю. Такие частицы называются безмассовыми. Энергия и импульс безмассовых частиц связаны соотношениями

$$E = pc$$

$$E^2 - p^2c^2 = 0$$

Эти соотношения экспериментально подтверждены. Однако для большинства частиц масса является одной из важнейших характеристик. Эти частицы называются массовыми. Скорость таких частиц $v < c$. Массовая частица обладает собственной энергией:

$$E = mc^2$$

Согласно этой формуле тело даже при скорости, равной нулю, обладает энергией — энергией покоя. Любое тело уже только благодаря факту своего существования обладает энергией, которая пропорциональна его массе m . При превращениях элементарных частиц, обладающих массой покоя $m \neq 0$, в частицы, у которых $m = 0$, их энергия покоя E_0 целиком превращается в кинетическую энергию вновь образовавшихся частиц. Этот факт является наиболее очевидным экспериментальным доказательством существования энергии покоя.

Во всех инерциальных системах отсчета импульс частицы и ее энергия связаны соотношением:

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$$

Эта формула является фундаментальным соотношением релятивистской механики и справедлива также и для безмассовых частиц. Так как величины m и c не меняются при переходе от одной системы отсчета к другой, то, следовательно, не меняется и значение $E^2 - p^2c^2$.

Энергия частицы выражается через ее импульс следующим образом:

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$

Используя эту формулу, а также учитывая, что импульс частицы пропорционален ее скорости и энергии, получаем выражения для импульса и энергии частицы:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

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

При $v \ll c$ получим выражение для импульса в классической механике:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- это выражение называется релятивистским множителем

При малых скоростях релятивистский множитель можно преобразовать:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}$$

Подставив это выражение в формулу энергии частицы получим

$$E \approx mc^2 + \frac{mv^2}{2}$$

где первое слагаемое в формуле — это собственная энергия частицы. второе слагаемое — это выражение для кинетической энергии в классической механике. Релятивистская энергия есть сумма собственной энергии частицы и релятивистской кинетической энергии E_k :

$$E = mc^2 + E_k$$

Тогда выражение для релятивистской кинетической энергии массовой частицы

$$E_k = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) mc^2$$

Заметим, что если v стремится к c , то E_k стремится к бесконечности, что невозможно. Это означает, что скорость массовой частицы всегда меньше скорости света.

Масса частицы имеет вид:

$$m = \frac{1}{c^2} \sqrt{E^2 - p^2 c^2}$$

Если частица покоится, то $m = \frac{E}{c^2}$

Обратим внимание на то, что так как подкоренное выражение в формуле массы частицы не зависит от выбора системы отсчета, то масса частицы не зависит от ее движения и остается одной и той же величиной во всех инерциальных системах отсчета.