

1. Опыт Майкельсона-Морли.
2. Постулаты Эйнштейна.
3. Преобразования Лоренца.

1. Опыт Майкельсона-Морли.

Принцип относительности Галилея утверждает, что равномерное и прямолинейное движение системы отсчета не влияет на механические процессы, происходящие в системе материальных точек. Отсюда следует полная равноценность инерциальных систем отсчета. Термины «покой» и «равномерное и прямолинейное движение» имеют относительный характер. В классической механике имеет смысл только относительное движение. Таким образом, уравнения механики инвариантны относительно преобразований Галилея и удовлетворяют принципу относительности Галилея.

С развитием электродинамики и получением уравнений Максвелла возникла необходимость применения принципа относительности и к электромагнитным явлениям. Однако было обнаружено, что уравнения Максвелла не инвариантны по отношению к преобразованиям Галилея.

Тогда появились сомнения по поводу правильности теории электромагнетизма Максвелла. Уравнения Максвелла стали переписывать, видоизменять и подгонять к тому, чтобы оказался выполненным принцип относительности Галилея. При этом в уравнениях электродинамики стали появляться новые члены, которые предсказывали новые электрические явления. Однако ни один из экспериментов этих явлений не обнаружил. Поэтому пришлось отказаться от попыток изменить уравнения Максвелла. Постепенно становилось ясно, что законы электродинамики абсолютно правильны, и подтверждаются огромным количеством экспериментов, а возникшая проблема состоит в чем-то другом.

Некоторые ученые предлагали отказаться от принципа относительности. Однако этот принцип тоже является обобщением опытных фактов.

В результате глубокого анализа сложившейся противоречивой ситуации начали формироваться представления о том, *что все дело в свойствах пространства и времени*. Здесь речь идет о том, что к этому времени были предложены формулы преобразований Лоренца и при их использовании к уравнениям Максвелла при переходе из одной ИСО в другую уравнения Максвелла оказались инвариантными относительно преобразований Лоренца.

Однако формулы преобразования Лоренца не были восприняты как новые реальные формулы перехода от инерциальной системы K' к системе K , движущихся друг относительно друга вдоль оси Ox . Все дело в том, что согласно преобразованиям Лоренца, при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, изменялись не только координаты, но и время (считалось, что время абсолютно). Поэтому требовалось в корне пересмотреть свойства пространства и времени, чтобы признать истинность закона преобразований Лоренца.

Известно, что скорость света c в XIX веке интерпретировалась как скорость относительно гипотетической неподвижной среды – мирового эфира. Предполагалось, что эфир заполняет пустое пространство и является той средой, в которой происходят все электромагнитные процессы.

В 1887 году Майкельсон и Морли провели опыт по обнаружению этого эфира или гипотетической среды, в которой, как предполагалось, распространяется свет. Идея опыта заключалась в следующем (рис.1). Полупрозрачное зеркало интерферометра (оптический измерительный прибор) расщепляет луч света на два когерентных луча. Один когерентный луч распространяется параллельно скорости вращения Земли, другой луч распространяется перпендикулярно скорости Земли. Эти

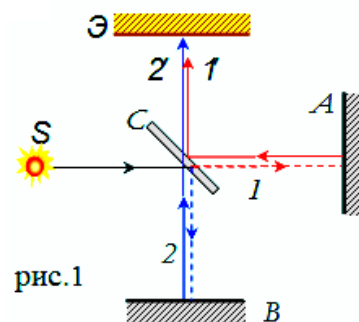


рис.1

когерентные лучи отражаются от двух равноудаленных от полупрозрачного зеркала зеркал-отражателей и возвращаются на полупрозрачное зеркало, результирующий пучок света от которого позволяет наблюдать интерференционную картину и выявлять малейшую *десинхронизацию* двух лучей (запаздывании одного луча относительно другого).

Согласно законам механики (принцип относительности Галилея) этот эксперимент дает следующий результат (рис.2). В первом случае, когда скорость света c параллельна скорости вращения Земли V , свет проходит путь L до зеркала за время

$$\tau_1 = \frac{L}{c - V}$$

а обратный путь - за время

$$\tau_2 = \frac{L}{c + V}$$

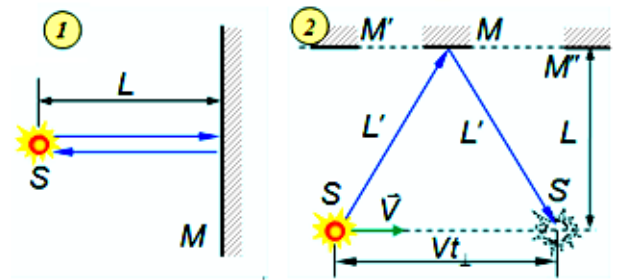


рис.2 Теория опыта Майкельсона и Морли

Сумма τ_1 и τ_2 дает полное время, затрачиваемое светом на прохождение пути до зеркала и обратно (рис.1 (1)):

$$t_{\parallel} = \tau_1 + \tau_2 = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V^2}{c^2}} \quad (1)$$

Во втором случае, когда скорость света перпендикулярна скорости вращения Земли, из-за движения зеркала и источника свет затратит на путь время

$$t_{\perp} = \frac{2L'}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{L^2 + \left(\frac{Vt_{\perp}}{2}\right)^2}$$

Решение этого уравнения дает

$$t_{\perp} = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) показывают, что времена распространения света во взаимно перпендикулярных направлениях не равны друг другу, т.е. $t_{\parallel} \neq t_{\perp}$.

Однако Майкельсон и Морли экспериментально получили обратный результат: никакой разницы во временах прохождения обоих путей обнаружено не было. Опыт повторили через полгода, когда Земля в своем орбитальном движении повернула в противоположную сторону. Результат оказался тем же.

Таким образом, из эксперимента Майкельсона и Морли следовало, что никакого эфира не существует, и скорость света в разных направлениях одинакова, т.е. скорость света постоянна независимо от того, в какой ИСО рассматривается распространение света.

Все эти факты: неприменимость принципа относительности Галилея к уравнениям Максвелла, преобразования Лоренца и их несовместимость с абсолютностью времени, результаты эксперимента Майкельсона и Морли, показавшие постоянство скорости света в разных ИСО, побудили к пересмотру свойства пространства и времени. Итогом такого пересмотра стала специальная теория относительности Эйнштейна.

2. Постулаты Эйнштейна.

Согласно принципу относительности Эйнштейна, равномерное и прямолинейное движение тел не оказывает влияния на происходящие в них процессы. Иными словами, все законы природы одинаковы в инерциальных системах отсчета. Если в некоторой инерциальной системе отсчета произвольный закон природы выражен в виде некоторого уравнения, в котором физическая величина является функцией координат и времени, то, совершая преобразование координат и времени при переходе к другой инерциальной системе отсчета, мы обязательно должны получить ту же самую функциональную зависимость физической величины в зависимости от новых координат и времени.

Это утверждение кратко формулируется так: **законы природы инвариантны (неизменны) при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.** Это утверждение известно как **первый постулат** специальной теории относительности.

Второй постулат теории относительности утверждает, что **существует предельная (максимальная) скорость распространения взаимодействий в пустоте.** И такой скоростью является скорость света в вакууме. Эта скорость является не только постоянной величиной, но и максимально возможной скоростью в природе, т.е. никакой сигнал, никакое воздействие одного тела на другое не может распространяться со скоростью большей, чем скорость света в вакууме. Скорость света в вакууме как максимальная скорость движения должна быть одинаковой во всех ИСО.

Эти два постулата (или принципа) лежат в основе специальной теории относительности Эйнштейна. Механика, учитывающая конечность скорости распространения взаимодействия, т.е. основанная на принципе относительности Эйнштейна, называется **релятивистской механикой.**

А теперь рассмотрим следствия из принципов относительности Эйнштейна. Первым следствием является тот факт, что в релятивистской механике относительным является не только пространство, но и время, т.е. время между какими-либо двумя событиями различно для наблюдателей в различных инерциальных системах отсчета:

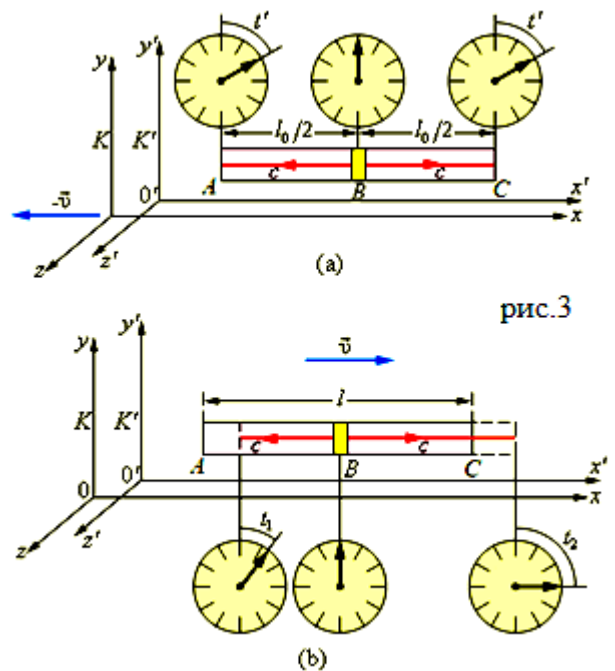
$$t \neq t'; \Rightarrow \Delta t \neq \Delta t'$$

В частности, теряет смысл понятие одновременности двух событий. В то время как для наблюдателя в одной системе отсчета два события являются одновременными, для наблюдателя в другой инерциальной системе отсчета эти события уже не являются одновременными. Для иллюстрации сказанного рассмотрим простой пример.

Пусть наблюдатель в системе K' , которая движется относительно системы K вправо со скоростью v , наблюдает распространение двух световых сигналов, испущенных со скоростью c из точки B вправо и влево (рис.3 а). Наблюдатель в системе K' регистрирует моменты прихода этих сигналов в точки A и C , которые находятся на одинаковом расстоянии l' от точки B в системе K' . Все три точки A, B и C движутся вместе с системой K' . Понятно, что в системе K' оба события, т.е. приход светового сигнала в точки A и C будут **одновременными**:

$$t'_{BA} = t'_{BC} = l' / c$$

Совершенно иная картина предстанет перед наблюдателем в системе K (рис.3 б). Он тоже наблюдает распространения светового сигнала из точки B . Принципиально важно, что из принципа относительности Эйнштейна следует, что в системе K скорость распространения светового сигнала будет той же, что и в системе K' , т.е. равна c . Но точка C в системе K движется вдоль направления распространения сигнала, а точка A навстречу сигналу. Поэтому $t_{BC} > t_{BA}$. Это означает, что по часам наблюдателя в системе K' сигнал придет в точки C и A одновременно, а по часам наблюдателя в системе K **не одновременно.**



Одним из фундаментальных соотношений специальной теории относительности является инвариантность пространственно-временного интервала:

$$S = S' = \text{invar} \quad (3)$$

По определению, величина

$$S_{12} = \sqrt{c^2 (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2}$$

называется интервалом между любыми двумя событиями в системе K . Для наблюдателя в системе K' интервал между теми же двумя событиями будет равен

$$S'_{12} = \sqrt{c^2 (t'_2 - t'_1)^2 - (x'_2 - x'_1)^2 - (y'_2 - y'_1)^2 - (z'_2 - z'_1)^2}$$

Понятие интервала в теории относительности является обобщением обычных понятий интервала (т.е. расстояния) между двумя точками и интервала (т.е. промежутка времени) между двумя событиями.

Инвариантность интервала (3) является математическим выражением принципа относительности Эйнштейна: **интервал между любыми двумя событиями одинаков во всех инерциальных системах отсчета, независимо от характера этих событий.**

Если два события бесконечно близки друг к другу, то

$$dS = dS' = \text{invar} \quad (4)$$

В классической механике таким свойством обладали по отдельности временной интервал

$$t_{12} = t_2 - t_1$$

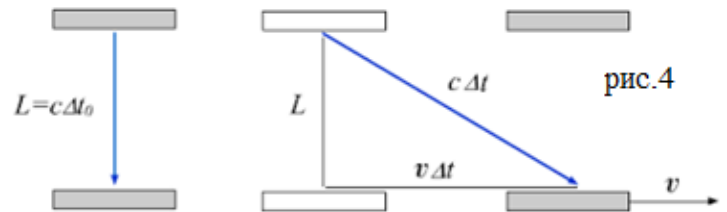
и пространственное расстояние

$$l_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2}$$

В релятивистской физике этим свойством обладает только интервал между событиями dS .

Таким образом, в специальной теории относительности существуют, по крайней мере, две величины, значения которых одинаковы во всех инерциальных системах: **скорость света c и пространственно-временной интервал S .**

Рассмотрим две системы K и K' , в системе K' находится вертикальный неподвижный стержень длиной L . ИСО K' движется относительно неподвижной системы K со скоростью v . При движении перпендикулярно длине стержня его длина, измеренная в системах K и K' остается постоянной. Измерим длину стержня в системах K и K' . Для этого поместим на одном конце стержня источник и приемник света, а на другом зеркало (рис.4). Свет, излучаемый источником, проходит до зеркала, отражается и попадает в приемник. Время, потраченное на путь до зеркала и обратно, делим пополам и, умножив результат на скорость света, получаем длину стержня в системе K' , где стержень покоится. В системе K стержень движется со скоростью v , и свет, чтобы попасть в приемник, должен распространяться по ломаной траектории. Из рис.4 следует, что в системе K



$$L^2 + (v\Delta t)^2 = (c\Delta t)^2$$

В системе K'

$$L' = L = c\Delta t'$$

Отсюда вытекает, что

$$(c\Delta t')^2 + (v\Delta t)^2 = (c\Delta t)^2$$

Из последнего уравнения получаем:

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (5)$$

Из формулы (5) вытекает, что время в разных ИСО течет по разному. Выражение (5) показывает изменение течения времени в разных ИСО, а не изменение хода часов.

Время, отсчитываемое по часам, движущимся вместе с объектом, называется **собственным временем этого объекта**. Обозначается τ_0 . Тогда $t' = \tau_0$, $\Delta t' = \Delta\tau_0$, отсюда следует

$$\Delta t = \frac{\Delta\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (6)$$

Движущиеся часы идут медленнее неподвижных часов. Замедление хода времени в движущейся системе, не связано с влиянием движения часов на их работу, а отражает неабсолютный характер времени.

Теперь рассмотрим, как изменяются размеры тел, в направлении их движения.

Допустим, что стержень расположен вдоль осей x и x' систем K и K' . Он движется со скоростью v относительно системы K (рис.5), и неподвижен относительно K' . В системе K' длина стержня (стержень покоится) определяется по формуле:

$$\Delta l' = l_0 = \frac{c\Delta t'}{2} \quad (7)$$

В системе K когда свет идет вправо, то зеркало от него отдаляется на расстояние $v\Delta t_1$ (стержень с системой K' движется со скоростью v). Δt_1 - время движения света до зеркала. Тогда расстояние, пройденное светом до зеркала, будет равно:

$$c\Delta t_1 = \Delta l + v\Delta t_1 \quad (8)$$

При движении обратно к приемнику свет пройдет расстояние, меньшее длины Δl стержня, так как приемник приближается, и соответственно время движения от зеркала до приемника равно Δt_2 . Это расстояние равно:

$$c\Delta t_2 = \Delta l - v\Delta t_2 \quad (9)$$

Находим Δt_1 и Δt_2 из уравнений (8) и (9), и суммируя их, находим общее время движения света до зеркала и обратно:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{\Delta l}{c-v} + \frac{\Delta l}{c+v} = \frac{2\Delta l}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \quad (10)$$

Из соотношения (10) определим длину стержня в системе K :

$$\Delta l = l = \frac{c\Delta t}{2} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \quad (11)$$

Подставив соотношение (5) в (11) и используя выражение (7), получим:

$$\Delta l = \frac{c\Delta t'}{2} \frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \Delta l' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{или} \quad l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (12)$$

Здесь l_0 ($\Delta l'$) длина стержня, измеренная в системе отсчета, в которой стержень неподвижен, и называется она **собственной длиной стержня**. Из формулы (12) следует, что **собственная длина стержня является максимальной. Во всех ИСО длина тел**

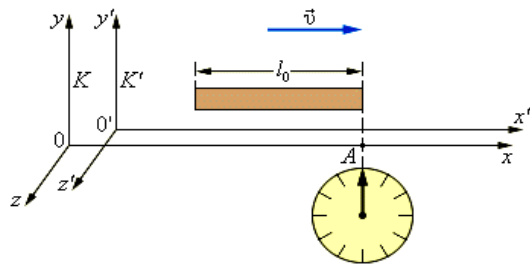
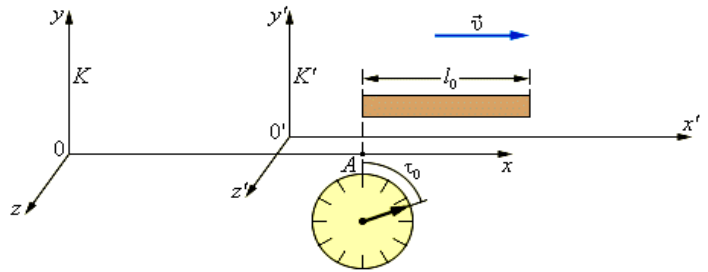


рис.5



уменьшается по сравнению с собственной. Это явление называется лоренцевым сокращением длины в направлении движения.

Лоренцево сокращение длины не связано с физическим воздействием движения на размеры тела. Оно отражает не абсолютность пространственных интервалов, их зависимость от выбора системы отсчета.

Вопросы для самоконтроля и обсуждения

1. В чем разница между принципом относительности в классической механике и принципом относительности Эйнштейна?
2. Что называется событием? Что такое интервал между событиями? Напишите выражение для интервала между двумя событиями.
3. Что такое собственная длина объекта? Как измерить длину стержня в различных инерциальных системах отсчета? Что такое лоренцево сокращение длины?
4. Что такое собственное время объекта? Как изменяется собственное время при переходе от одной инерциальной системы координат к другой?
5. Сокращаются ли поперечные размеры тел при движении?