

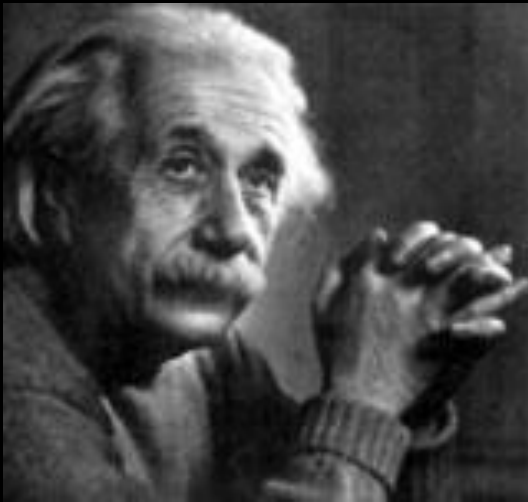
ФИЗИКА

**Элементы кинематики специальной
теории относительности.
Динамика материальной точки.**

Лекционная презентация

Авторы: Ф.А. Сидоренко, П.С.Попель, Н.М.Барбин

Краткая история



1905 год

А.Эйнштейн, К электродинамике движущихся сред

Последующие годы – интерпретация, экспериментальные обоснования

Классические представления о пространстве и времени

В классической механике считается, что предельная скорость передачи взаимодействий в природе может быть бесконечно большой.

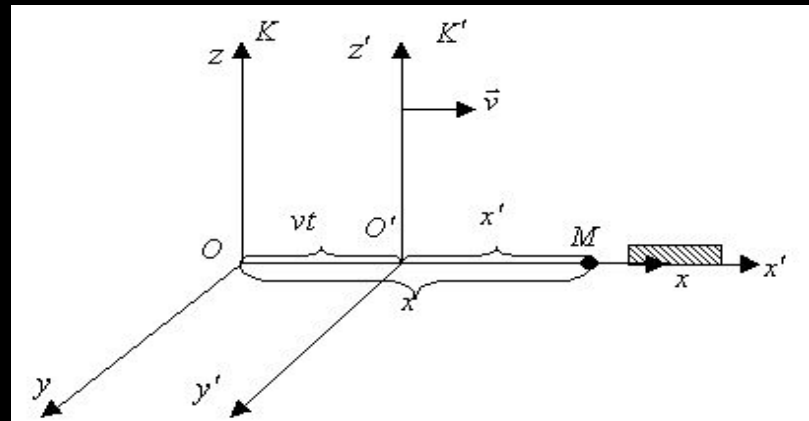
Пространство и время абсолютны, не связаны друг с другом; время течет одинаково во всех ИСО ($t=t'$); пространство и время не зависят от наличия вещества, пространство является пустымместилищем материальных тел.

Классические представления о пространстве и времени. Преобразования Галилея

Понятие «событие» $\rightarrow x, y, z, t$

$$K \rightarrow K' \begin{cases} x' = x - v t \\ y' = y, z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

$$K' \rightarrow K \begin{cases} x = x' + v t \\ y = y', z = z' \\ t = t' \end{cases}$$



Следствие: $u = u' + v$

Скорость тела
относительно
системы K

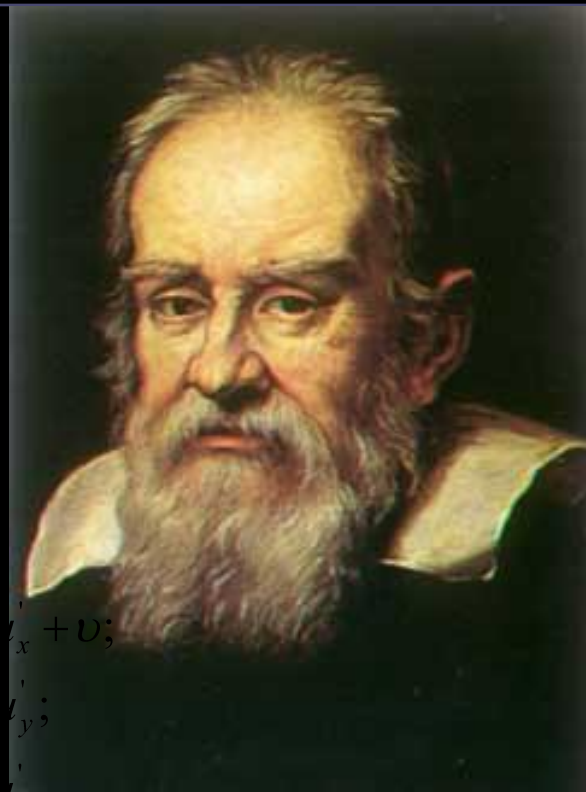
Скорость тела
относительно
системы K'

Скорость системы
K' относительно
системы K

Совокупность этих уравнений носит название **преобразований Галилея**

В классической физике считалось, что время в обеих системах течет одинаково, т.е. что

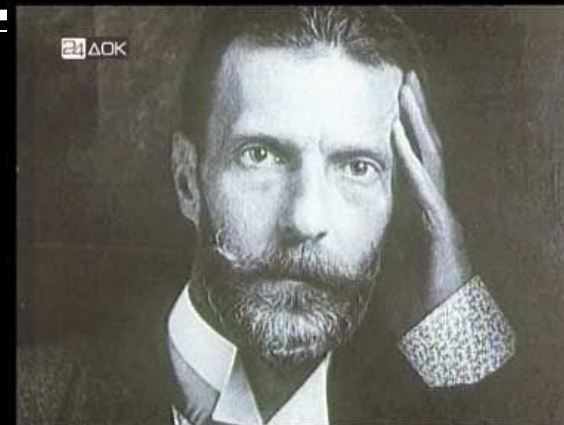
**Галилей
Галилео
1564 - 1642**



Эксперимент Майкельсона-Морли

- В 1887 году два американских физика — Альберт Майкельсон и Генри Морли — решили совместно провести эксперимент, призванный раз и навсегда доказать скептикам, что *светоносный эфир* реально существует, наполняет ~~Вселенную и служит средой, в которой распространяются~~ свет и прочие электромагнитные волны. Майкельсон обладал непрекаемым авторитетом как конструктор оптических приборов, а Морли славился как неутомимый и непогрешимый физик-экспериментатор. Придуманный ими опыт проще описать, чем провести практически.

Альберт Абрахам МАЙКЕЛЬСОН Albert Abraham Michelson, 1852–1931

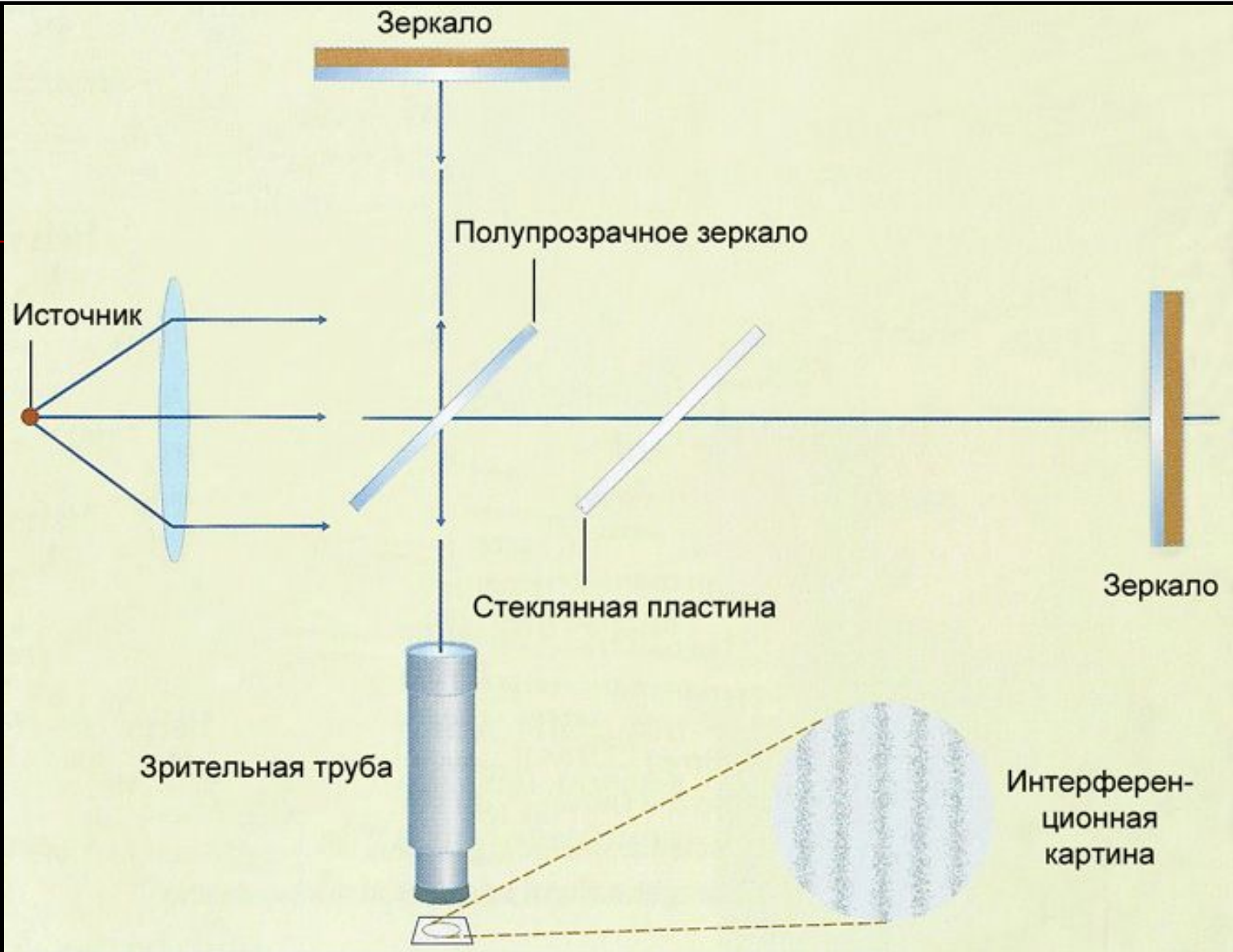


Американский физик, немец по национальности (на снимке). Родился в местечке Стрельно (ныне Стшельно) на территории современной Польши (в те годы входившей в состав Российской империи). В возрасте двух лет вместе с родителями эмигрировал в США. Вырос в Калифорнии в эпоху знаменитой «золотой лихорадки», однако отец будущего ученого занимался не поисками золота, а мелкооптовой торговлей в городах, охваченных этим недугом. Поступил в Академию ВМФ США по особой рекомендации некоего конгрессмена от своего штата, был принят на действительную службу, прошел полный курс строевой подготовки, после чего был назначен преподавателем физики. Благодаря этому у него появилась возможность заниматься оптикой и, в частности, строительством прибора для определения скорости света. После выхода в отставку с действительной службы в 1881 году стал преподавателем Школы прикладных наук им. Кейса (Case School of Applied Sciences) в Кливленде, штат Огайо, где и продолжил свои исследования. В 1907 году Майкельсон был удостоен Нобелевской премии по физике «за создание прецизионных оптических инструментов и за выполненные с их помощью исследования», а именно, за точное определение длины стандартного метра и скорости света в вакууме

Американский физик и химик. Родился в Ньюарке, штат Нью-Джерси в семье церковнослужителя-конгрегационалиста. По причине слабого здоровья школу не посещал, а учился дома, причем отец готовил его к продолжению служения церкви, однако мальчик предпочел естественные науки и занялся изучением химии и природоведения. В конце концов, из него получился прекрасный экспериментатор. Именно Морли удалось с непревзойденной точностью определить удельные массы водорода и кислорода в составе чистой воды. Когда же судьба свела его с Альбертом Майкельсоном, его навыки экспериментатора оказались просто незаменимыми, и теперь имена двух этих ученых неразрывно связаны благодаря их знаменитому опыту.



Эдвард Уильямс МОРЛИ
Edward Williams Morley, 1838–1923



- Майкельсон и Морли использовали *интерферометр* — оптический измерительный прибор, в котором луч света расщепляется надвое полупрозрачным зеркалом (стеклянная пластина посеребрена с одной стороны ровно настолько, чтобы частично пропускать поступающие на нее световые лучи, а частично отражать их; аналогичная технология сегодня используется в зеркальных фотоаппаратах). В итоге луч расщепляется и два получившихся *когерентных* луча расходятся под прямым углом друг к другу, после чего 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)

- Опыт Майкельсона—Морли был принципиально направлен на то, чтобы подтвердить (или опровергнуть) существование мирового эфира посредством выявления «эфирного ветра» (или факта его отсутствия). Действительно, двигаясь по орбите вокруг Солнца, Земля совершает движение относительно гипотетического эфира полгода в одном направлении, а следующие полгода в другом. Следовательно, полгода «эфирный ветер» должен обдувать Землю и, как следствие, смещать показания интерферометра в одну сторону, полгода — в другую. Итак, наблюдая в течение года за своей установкой, Майкельсон и Морли не обнаружили никаких смещений в интерференционной картине: полный эфирный штиль! (Современные эксперименты подобного рода, проведенные с максимально возможной точностью, включая эксперименты с лазерными интерферометрами, дали аналогичные результаты.) Итак: **эфирного ветра, а, стало быть, и эфира не существует.**

Вывод:

- В отсутствие эфирного ветра и эфира, как такового, стал очевиден неразрешимый конфликт между классической механикой Ньютона (подразумевающей некую абсолютную систему отсчета) и уравнениями Максвелла (согласно которым скорость света имеет предельное значение, не зависящее от выбора системы отсчета), что и привело в итоге к появлению теории относительности. Опыт Майкельсона—Морли окончательно показал, что «абсолютной системы отсчета» в природе не существует. И, сколько бы Эйнштейн впоследствии ни утверждал, что вообще не обращал внимания на результаты экспериментальных исследований при разработке теории относительности, сомневаться в том, что результаты опытов Майкельсона — Морли способствовали быстрому восприятию столь радикальной теории научной общественностью всерьез, вряд ли придется.

Постулаты СТО

1. Никакими физическими опытами, находясь внутри ИСО, нельзя установить, движется она равномерно и прямолинейно или покоится.

Или: все законы физики выглядят, записываются одинаково во всех ИСО (то есть **инвариантны** относительно перехода из одной ИСО в другую)

– **принцип относительности Эйнштейна**

2. Скорость света в пустоте одинакова во всех ИСО и не зависит от движения источника и приемника света

– **принцип постоянства скорости света**

(опыты Майкельсона – Морли, 1881-1887 гг.)

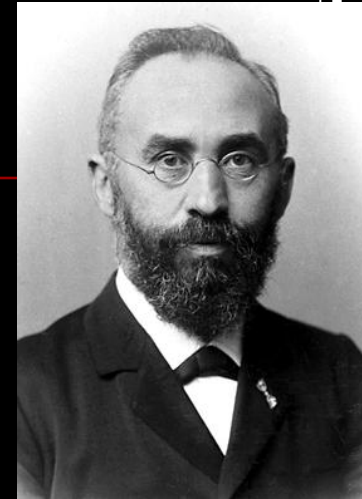
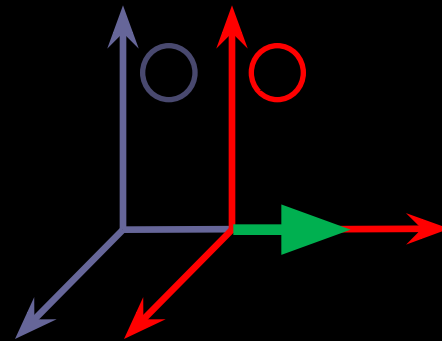
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА

Анализ явлений в инерциальных системах отсчета, проведенный А. Эйнштейном на основе сформулированных им постулатов, показал, что классические преобразования Галилея несовместимы с ними и, следовательно, должны быть заменены преобразованиями, удовлетворяющими постулатам теории относительности.

Рассмотрим **две** инерциальные системы отсчета:

1. K (с координатами x, y, z) и

2. K' (с координатами x', y', z'), движущуюся относительно K (вдоль оси x) со скоростью $v = \text{const}$.



Лоренц
Хендрик
Антон
1853 - 1928

Преобразования Лоренца

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \\ y' &= y, \quad z' = z \\ t' &= \frac{t - xv / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \\ y &= y', \quad z = z' \\ t &= \frac{t' + x'v / c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \end{aligned} \right\}$$

Координаты события – действительные и конечные числа.

Поэтому относительная скорость систем отсчета не превышает скорость света в пустоте

- В случае $v \ll c$ преобразования Лоренца переходят в ~~преобразования Галилея. Таким образом, преобразования~~ Галилея сохраняют значение для скоростей, малых по сравнению со скоростью света.

- При выражения становятся мнимыми. Это находится в соответствии с тем, что движение со скоростью, большей скорости света в пустоте, невозможно. Нельзя также пользоваться системой отсчета, движущейся со скоростью c , так как при $v=c$ в знаменателях формул получается нуль.

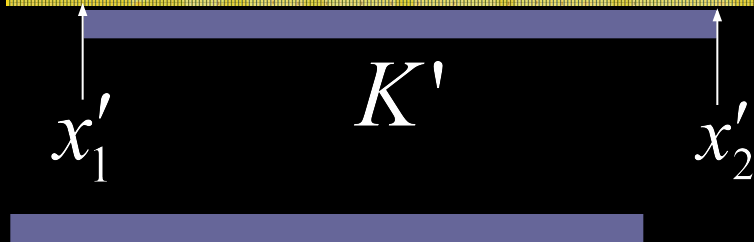
Следствия преобразований Лоренца

- Сокращение длин
- Замедление времени
- Релятивистская формула сложения скоростей
- Парадокс мюона

Следствия преобразований Лоренца. Сокращение длин



– «собственная длина»



Длина в системе K ?

Как фиксировать координаты?

$$K \quad l = x_2 - x_1 \quad t_2 = t_1 \quad \text{– одновременно!}$$

$$l_0 = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{x_1 - vt_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{l}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$l < l_0$$

«Лоренцево сокращение»

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ СОБЫТИЙ В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА

Пусть в точке, неподвижной относительно системы K' , происходит событие, длящееся время $\Delta t' = t'_2 - t'_1$.

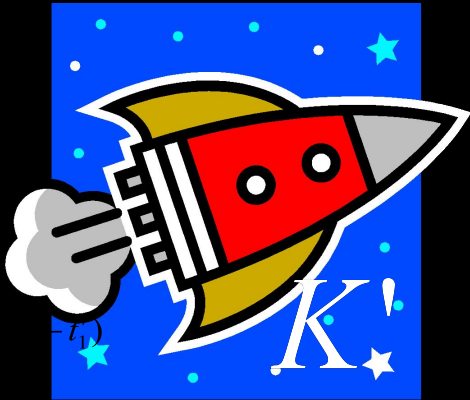
Пусть в точке, неподвижной относительно системы K' , происходит событие, длящееся время $\Delta t' = t'_2 - t'_1$.

Началу и концу события в системе K соответствует время:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Пусть в точке, неподвижной относительно системы K' , происходит событие, длящееся время $\Delta t' = t'_2 - t'_1$.

Следствия преобразований Лоренца. Замедление времени



Это «собственное время» –
события происходят в одном месте

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

$$\Delta t > \Delta t_0$$

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ПОНЯТИЯ ДНОВРЕМЕННОСТИ СОБЫТИЙ

Пусть в системе K в точках с координатами x_1 и x_2 происходят одновременно два события в моменты времени

$$t_1 = t_2 = t.$$

Тогда, из преобразований Лоренца

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

В системе K' этим событиям будут соответствовать координаты и моменты времени

Пусть в точке, неподвижной относительно системы K' , происходит событие, длящееся время $\Delta t' = t'_2 - t'_1$.

Релятивистская формула сложения скоростей

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}$$

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{v}{c^2} u_x}$$

Парадокс мюона

$$\tau_0 \approx 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

Мюоны рождаются в верхних слоях земной атмосферы и за время жизни успевают долететь до поверхности Земли

Высота земной атмосферы более 10 км.

Парадокс!?

Надо рассматривать время и расстояние в одной и той же системе отсчета, а не в разных!

Итог: пространство и время – связанные физические категории