

# *Основы специальной теории относительности*

© В.Е.Фрадкин, 2004

Из коллекции [www.eduspb.com](http://www.eduspb.com)

# Домашнее задание № 1

Г.Н. Степанова. Физика-11, ч.1

стр. 130 – Введение

§ 28 – знать:

*В чем проявляется относительность  
механического движения*

*Принцип относительности Галилея*

*Суть и принцип опыта Майкельсона*

*Постулаты СТО*

§ 29 – знать:

*Смысл и формулы для кинематических  
следствий СТО*

# Специальная (или частная) теория относительности (СТО)

- представляет собой современную физическую теорию пространства и времени.
- 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.

# Создатели СТО

Специальная теория относительности была создана *А. Эйнштейном* (1905 г.).

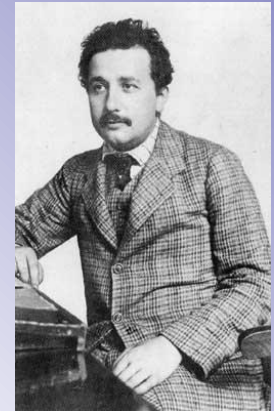
Предшественниками Эйнштейна, очень близко подошедшими к решению проблемы, были нидерландский физик *Х. Лоренц* и выдающийся французский физик *А. Пуанкаре*.

Значительный вклад внесли Д. Лармор, Д. Фитцджеральд, математик Г. Минковский.

# Альберт Эйнштейн (Einstein)

(14.III.1879–18.IV.1955)

- Физик-теоретик, один из основателей современной физики. Родился в Германии, с 1893 жил в Швейцарии, в 1933 эмигрировал в США.
- В 1905 вышла в свет его первая серьезная научная работа, посвященная броуновскому движению: «О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, вытекающем из молекулярно-кинетической теории». В том же году вышла и другая работа Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения на возникновение и превращение света». Вслед за Максом Планком он выдвинул предположение, что свет испускается и поглощается дискретно, и сумел объяснить фотоэффект. Эта работа была удостоена Нобелевской премии (1921).
- Наибольшую известность Эйнштейну все же принесла теория относительности, изложенная им впервые в 1905 году, в статье «К электродинамике движущихся тел».



# Хендрик Антон Лоренц (Lorentz)

(18.VII.1853–4.II.1898)



Нидерландский физик-теоретик, создатель классической электронной теории. Работы в области электродинамики, термодинамики, оптики, теории излучения, атомной физики.

Исходя из электромагнитной теории Максвелла–Герца и вводя в учение об электричестве атомистику, создал (1880–1909) классическую электронную теорию, основанную на анализе движений дискретных электрических зарядов. Вывел формулу, связывающую диэлектрическую проницаемость с плотностью диэлектрика, и зависимость показателя преломления вещества от его плотности (формула Лоренца–Лоренца), дал выражение для силы, действующей на движущийся заряд в магнитном поле (сила Лоренца), объяснил зависимость электропроводности вещества от теплопроводности, развил теорию дисперсии света.

Для объяснения опыта Майкельсона–Морли выдвинул (1892) гипотезу о сокращении размеров тел в направлении их движения (сокращение Лоренца). В 1904 вывел формулы, связывающие между собой пространственные координаты и моменты времени одного и того же события в двух различных инерциальных системах отсчета (преобразования Лоренца). Подготовил переход к теории относительности.



# Анри Пуанкаре (Poincare)

(29.IV.1854–17.VII.1912)

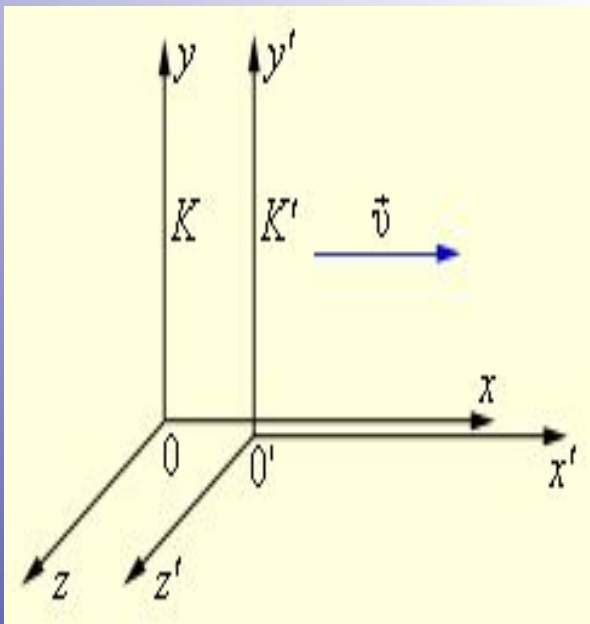
- Французский математик и физик. Основные труды по топологии, теории вероятностей, теории дифференциальных уравнений, теории автоморфных функций, неевклидовой геометрии.

Занимался математической физикой, в частности теорией потенциала, теорией теплопроводности, а также решением различных задач по механике и астрономии.



В 1905 написал сочинения «О динамике электрона», в которой независимо от А. Эйнштейна развил математические следствия «постулата относительности».

# Принцип относительности и преобразования Галилея.

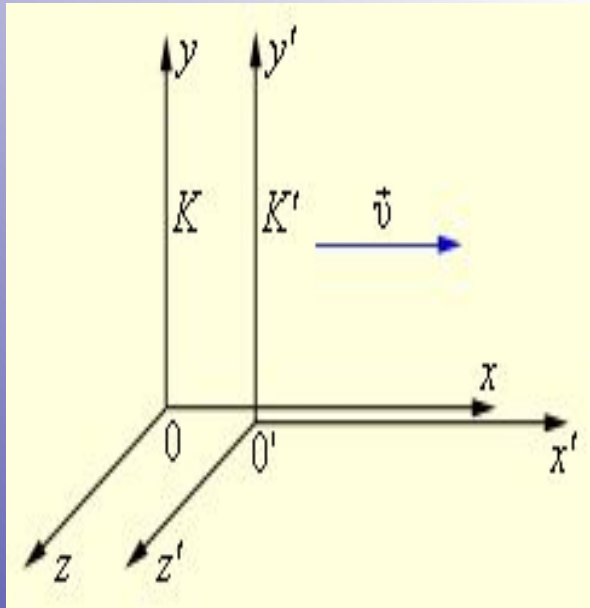


- **законы динамики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета.**
  - Этот принцип означает, что законы динамики **инвариантны** (т. е. неизменны) относительно **преобразований Галилея**, которые позволяют вычислить координаты движущегося тела в одной инерциальной системе ( $K$ ), если заданы координаты этого тела в другой инерциальной системе ( $K'$ ).
- В частном случае, когда система  $K'$  движется со скоростью  $v$  вдоль положительного направления оси  $x$  системы  $K$  преобразования Галилея имеют вид:  
$$x = x' + v_x t, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.$$

В начальный момент оси координат обеих систем совпадают.



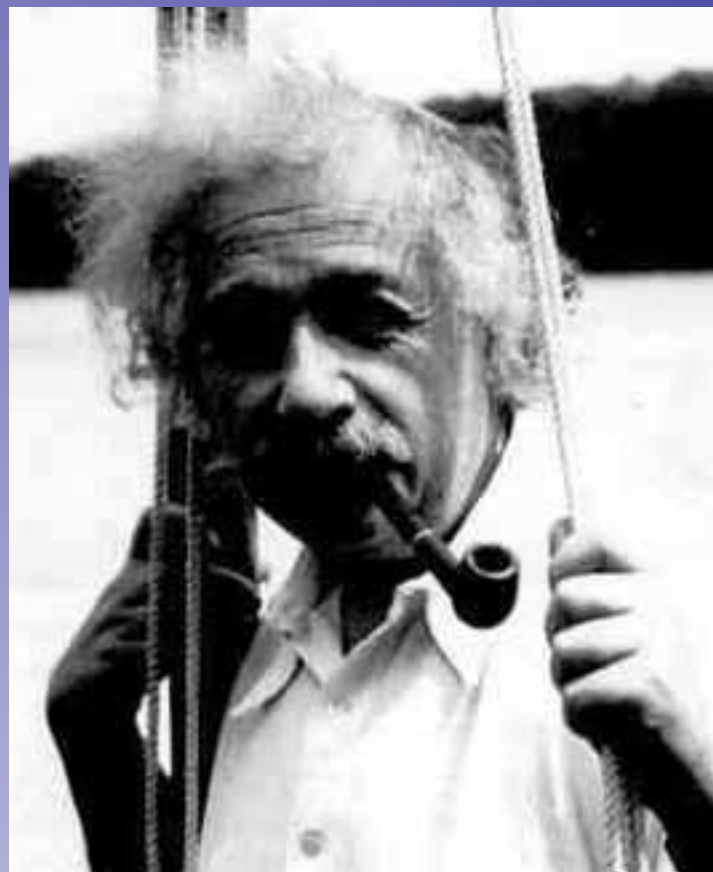
# Принцип относительности и преобразования Галилея.



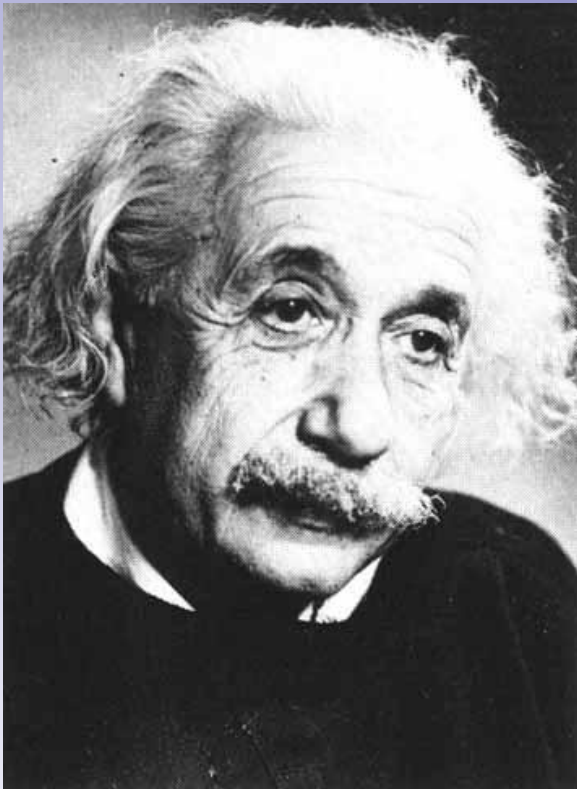
- Следствие преобразований Галилея - **закон преобразования скоростей** при переходе от одной системы отсчета к другой:  
$$v_x = v'_x + v, \quad v_y = v'_y, \quad v_z = v'_z.$$
- **Ускорения** тела во всех инерциальных системах оказываются **одинаковыми**. Следовательно, **уравнение движения классической механики не меняет своего вида при переходе от одной инерциальной системы к другой**.

# Постулаты СТО

- В основе специальной теории относительности лежат **два постулата** (или принципа), сформулированные Эйнштейном в 1905 г.
- Эти принципы являются обобщением всей совокупности ***опытных фактов***.



# Принцип относительности Эйнштейна:



- **все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой.**

Это означает, что во всех инерциальных системах физические законы (не только механические)

**имеют одинаковую форму.**

# Принцип постоянства скорости света:

- **скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.**

Скорость света в СТО занимает особое положение. Это предельная скорость передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую.



# Принцип соответствия Н.Бора

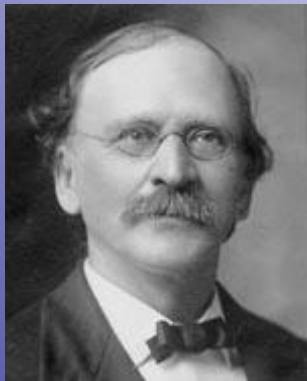
- новая теория (СТО) не отвергла старую классическую механику Ньютона, а только уточнила пределы ее применимости. Такая взаимосвязь между старой и новой, более общей теорией, включающей старую теорию как предельный случай, носит название принципа соответствия.



# Опыты Майкельсона и Морли



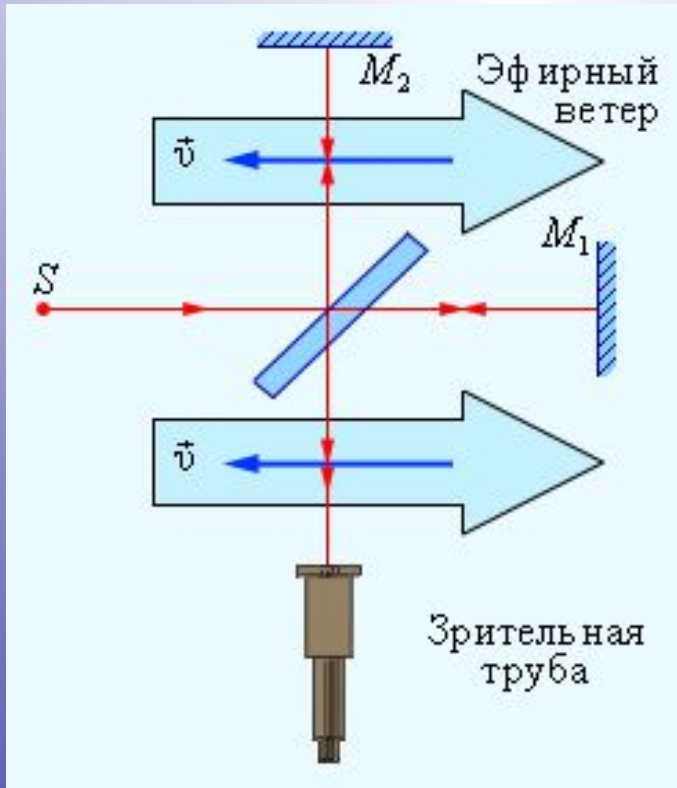
- **Майкельсон** (Michelson) Альберт (19.XII.1852–9.V.1931). Американский физик. В 1878–82 и 1924–26 провел измерения скорости света, долгое время остававшиеся непревзойденными по точности. В 1881 экспериментально доказал и совместно с Э. У. Морли (1885–87) подтвердил с большой точностью независимость скорости света от скорости движения Земли.



- **Морли** (Morley) Эдвард Уильямс (29.I.1839–1923) Американский физик. Наибольшую известность получили его работы в области интерферометрии, выполненные совместно с Майкельсоном. В химии же высшим достижением Морли было точное сравнение атомных масс элементов с массой атома водорода, за которое ученый был удостоен наград нескольких научных обществ.



# Принцип опыта



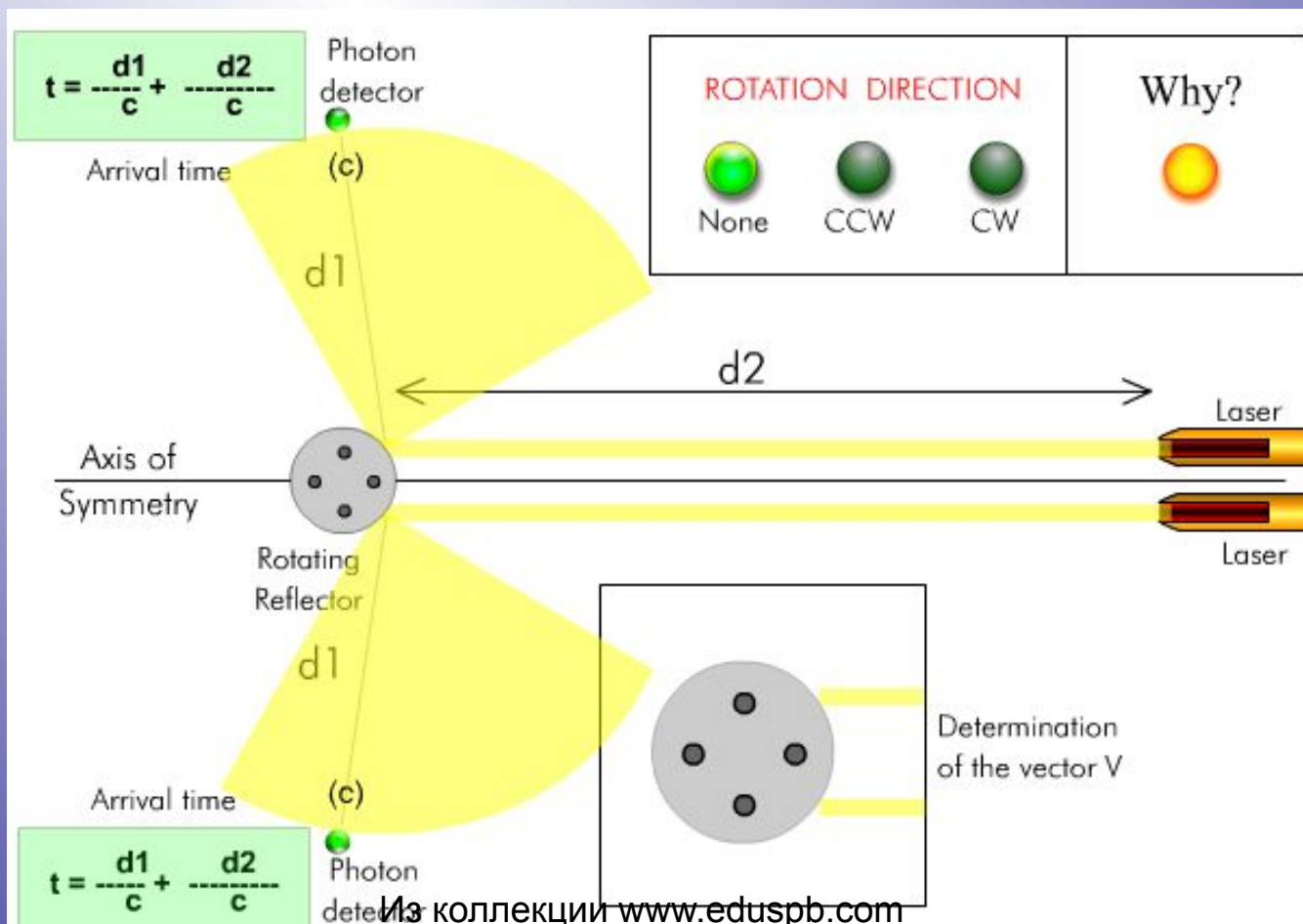
**Цель опыта – измерить скорость света относительно «эфирного ветра» (параллельно и перпендикулярно движению Земли).**

Упрощенная схема интерференционного опыта Майкельсона–Морли.

( $v$  – орбитальная скорость Земли).

# Идея опыта

- Наблюдение смещения интерференционных полос.



# Преобразования Лоренца

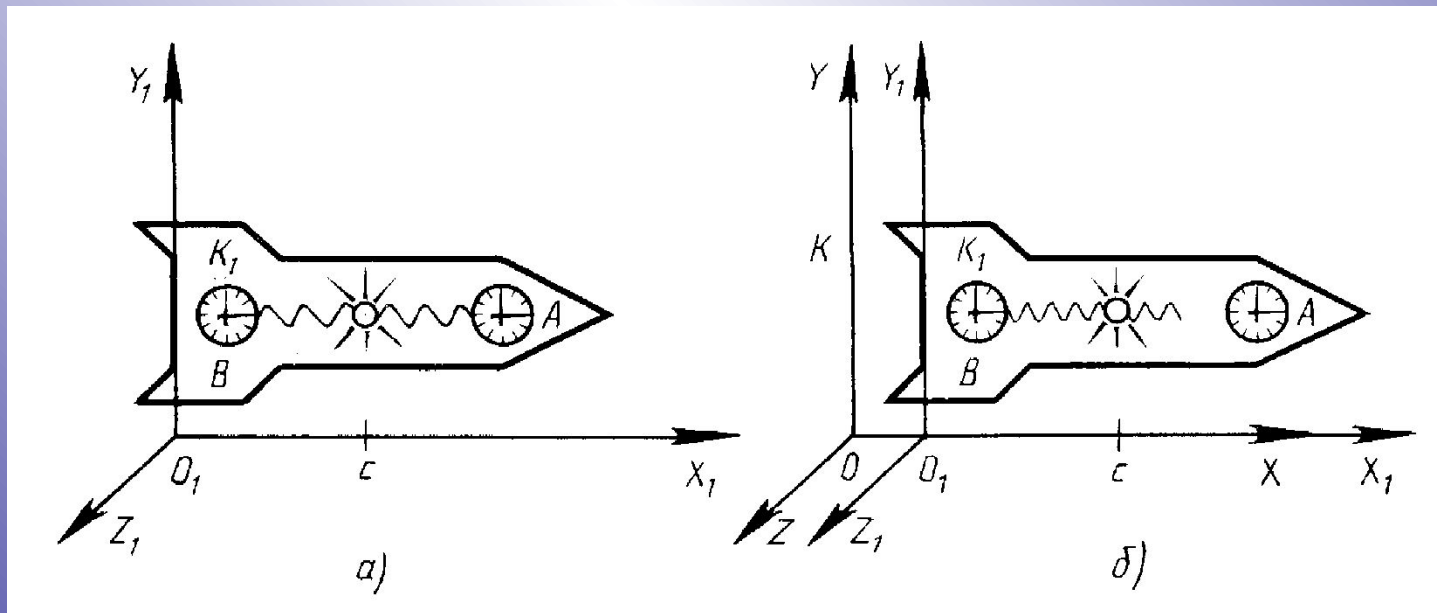
- Кинематические формулы преобразования координат и времени в СТО называются **преобразованиями Лоренца**. Они были предложены в 1904 году еще до появления СТО как преобразования, относительно которых инвариантны уравнения электродинамики.

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

$$\begin{cases} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \frac{t' + vx'/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \end{cases} \quad \begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \end{cases}$$

# Относительность одновременности

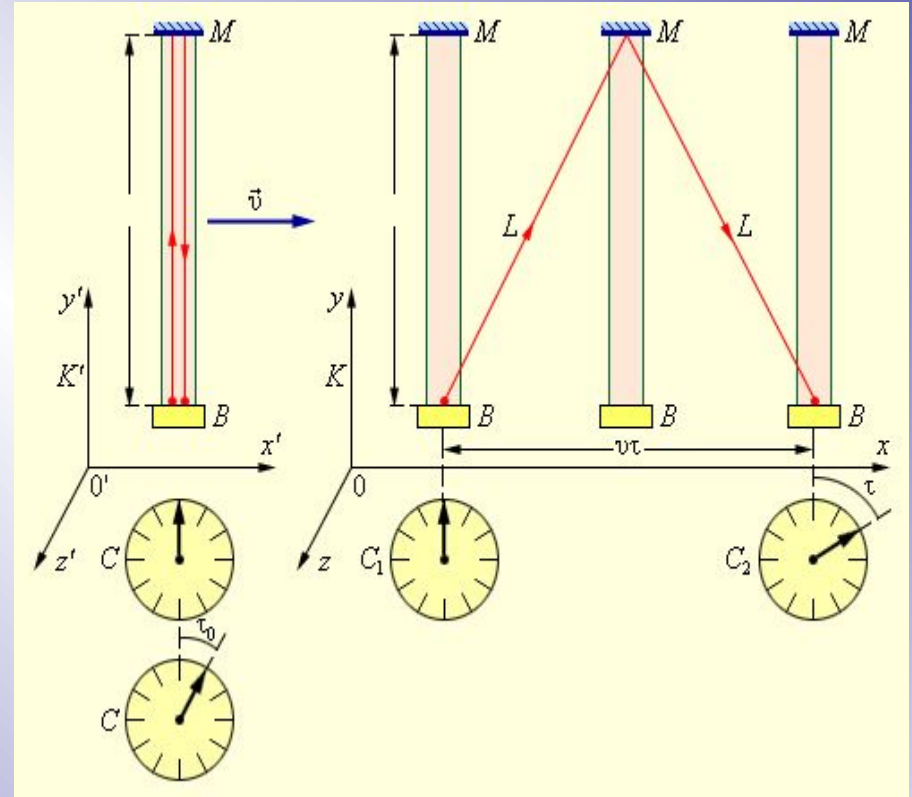
- события, являющиеся одновременными в одной ИСО, неодновременны в другой ИСО, движущейся относительно первой



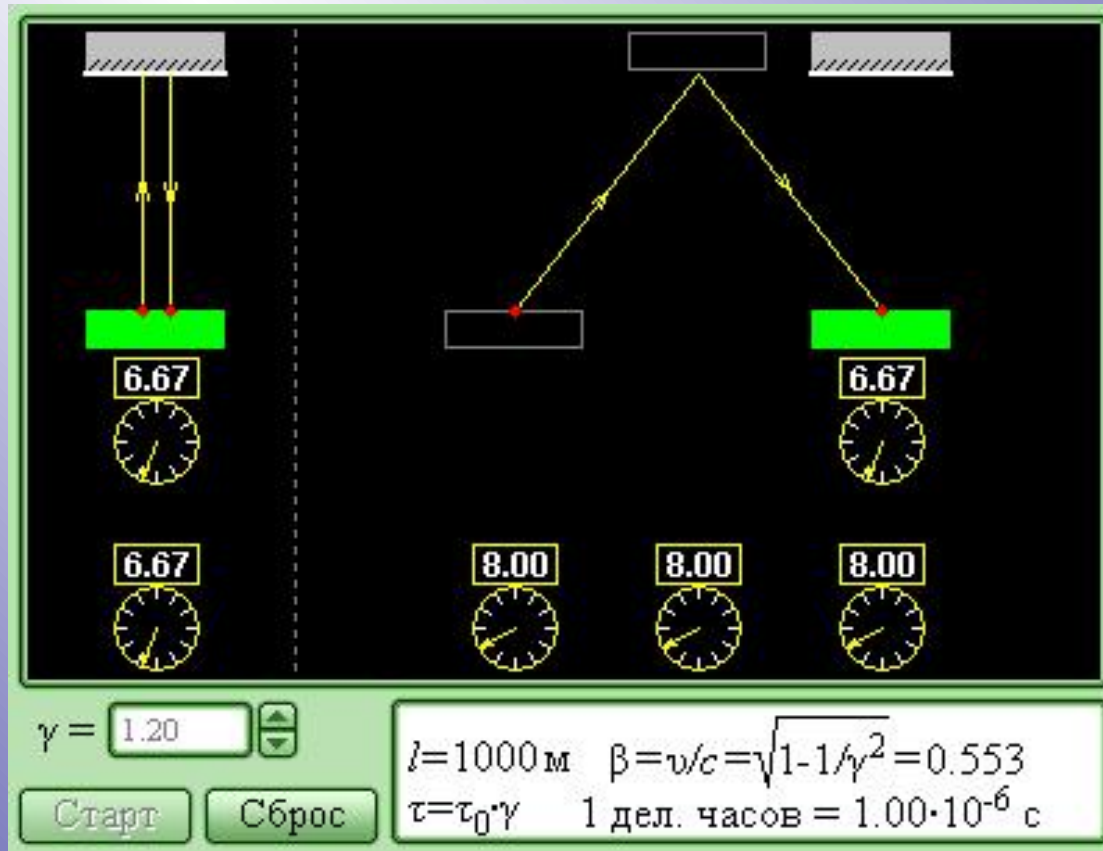
# Относительность промежутков времени.

- 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  $K$ .

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



# Относительность промежутков времени.





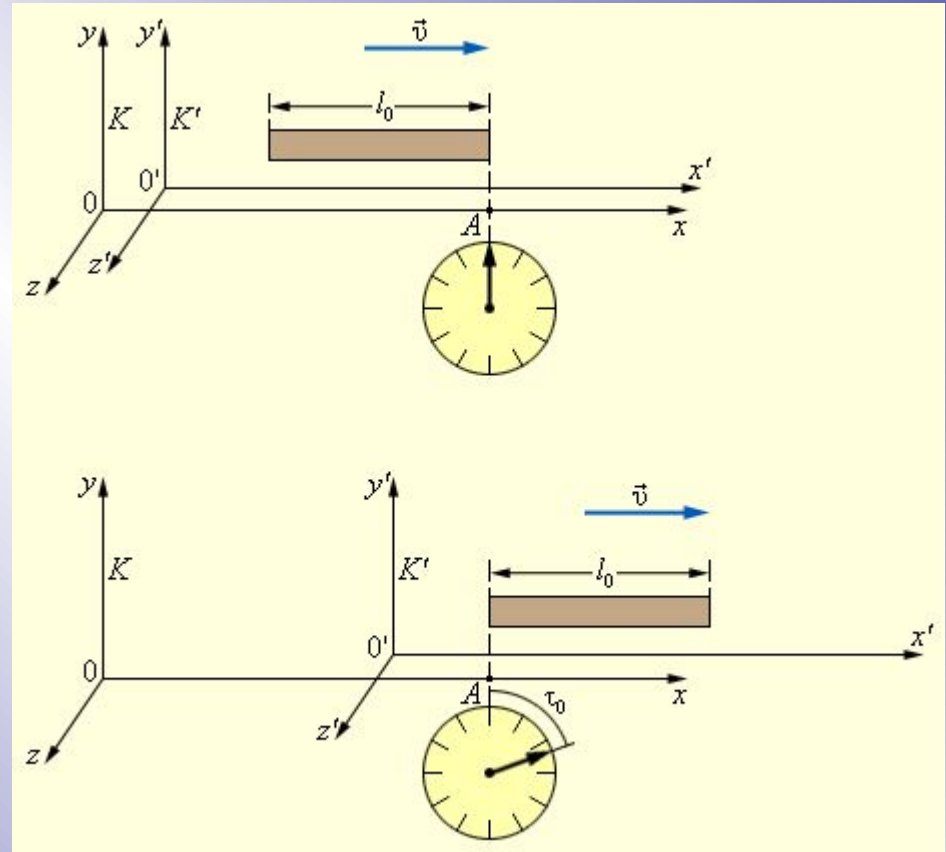
# Пример

- если космонавты отправляются к звездной системе (и обратно), находящейся на расстоянии 500 световых лет от Земли, со скоростью  $v=0,9999c$ , то на это потребуется по их часам 14,1 года; в то время как на Земле пройдет 10 веков

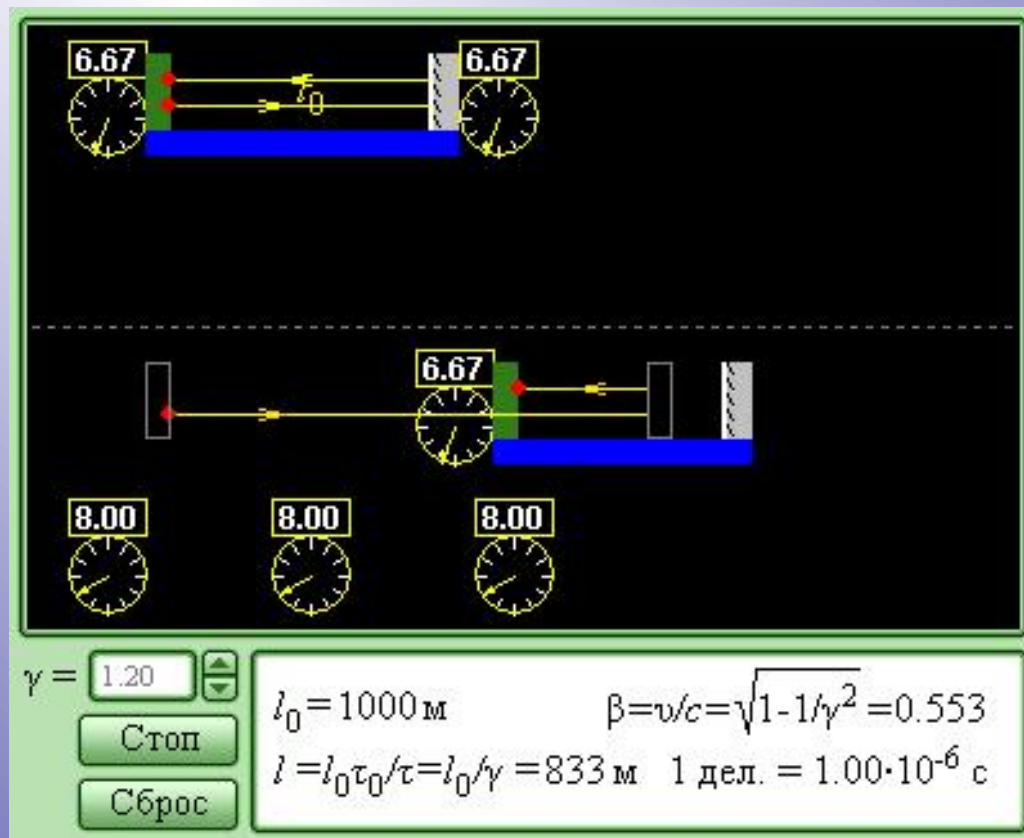
# Относительность расстояний

Измерение длины движущегося стержня

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



# Относительность расстояний



# Домашнее задание № 2

Г.Н. Степанова. Физика-11, ч.1

§ 30, 31 – знать:

*Формулу сложения скоростей и ее смысл.*

*Формулу релятивистского импульса*

*Формулы полной энергии и энергии покоя*

*Связь энергии и импульса*

*Понимать задачи и границы применимости СТО,  
принцип соответствия*

**В помощь:**

*Таблица «Подведем итоги» на стр. 146.*

# Сложение скоростей

Эти соотношения выражают **релятивистский закон сложения скоростей** для случая, когда частица движется параллельно относительной скорости систем отсчета  $K$  и  $K'$ .

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2}u'_x}, \quad u_y = 0, \quad u_z = 0.$$

При  $v \ll c$  релятивистские формулы переходят в формулы классической механики:

$$u_x = u'_x + v, \quad u_y = 0, \quad u_z = 0.$$

# Сложение скоростей

Если в системе  $K'$  вдоль оси  $x'$  распространяется со скоростью  $u'_x = c$  световой импульс, то для скорости  $u_x$  импульса в системе  $K$  получим

$$u_x = \frac{c + v}{1 + v/c} = c, \quad u_y = 0, \quad u_z = 0.$$

*В любом случае выполняется условие*

$$u_x \leq c.$$

Например, пусть  $u'_x = c$  и  $v = c$ .

Тогда: 
$$u = \frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = \frac{2c}{2} = c$$



# Импульс в СТО

- Уравнения классической механики Ньютона оказались неинвариантными относительно преобразований Лоренца, и поэтому СТО потребовала пересмотра и уточнения законов механики.
- В основу такого пересмотра Эйнштейн положил требования выполнимости закона сохранения импульса и закона сохранения энергии в замкнутых системах.
- Для этого оказалось необходимым изменить определение импульса тела.

**Релятивистский импульс** тела с массой  $m$ , движущегося со скоростью  $\vec{v}$  записывается в виде

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

# Масса в СТО

- Масса  $m$ , входящая в выражение для импульса, есть фундаментальная характеристика частицы, не зависящая от выбора инерциальной системы отсчета, а, следовательно, и от скорости ее движения.

(Во многих учебниках прошлых лет ее было принято обозначать буквой  $m_0$  и называть *массой покоя*. Кроме того, вводилась так называемая *релятивистская масса*, зависящая от скорости движения тела. Современная физика постепенно отказывается от этой терминологии).

# Динамика СТО

- **Основной закон релятивистской динамики** материальной точки записывается так же, как и второй закон Ньютона, но только в СТО под понимается релятивистский импульс частицы:

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

- Следовательно 
$$a = \frac{F}{m} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

# Энергия в СТО

- Вычисление кинетической энергии приводит к следующему выражению:
- Эйнштейн интерпретировал первый член в правой части этого выражения как *полную энергию*  $E$  движущейся частицы, а второй член как *энергию покоя*.

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

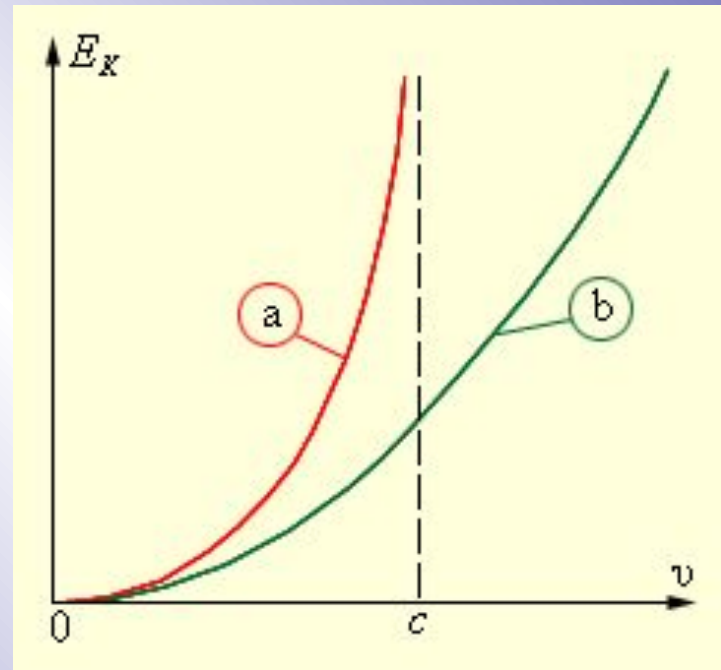
$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$E_0 = mc^2$$

# Зависимость кинетической энергии от скорости

- Зависимость кинетической энергии от скорости для релятивистской (a) и классической (b) частиц.

При  $v \ll c$  оба закона совпадают.



# Связь массы и энергии

- Утверждение о том, что находящаяся в покое масса  $m$  содержит огромный запас энергии получило разнообразные практические применения, включая использование ядерной энергии.

*Если масса частицы или системы частиц уменьшилась на  $\Delta m$ , то при этом должна выделиться энергия  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ .*

Многочисленные прямые эксперименты дают убедительные доказательства существования энергии покоя.



# Связь массы и энергии

- Закон пропорциональности массы и энергии является одним из самых важных выводов СТО. Масса и энергия являются характеристиками материальных объектов.

**Масса** тела характеризует его инертность, а также способность тела вступать в гравитационное взаимодействие с другими телами.

Важнейшим свойством **энергии** является ее способность превращаться из одной формы в другую в эквивалентных количествах при различных физических процессах.

Формула Эйнштейна выражает фундаментальный закон природы, который принято называть **законом взаимосвязи массы и энергии**.

$$E_0 = mc^2$$

# Связь энергии и импульса

- Между полной энергией, энергией покоя и импульсом существует следующая связь:

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2$$

- Отсюда следует, что для покоящихся частиц  
( $p = 0$ )

$$E = E_0 = mc^2.$$

# Безмассовые частицы

- Т.о. частица может иметь энергию и импульс, но не иметь массы ( $m = 0$ ). Такие частицы называются *безмассовыми*. Для безмассовых частиц связь между энергией и импульсом выражается простым соотношением  $E = pc$ .
- К безмассовым частицам относятся фотоны – кванты электромагнитного излучения и, возможно, нейтрино.
- Безмассовые частицы не могут существовать в состоянии покоя, во всех инерциальных системах отсчета они движутся с предельной скоростью  $c$ .

# Подведем итоги

## ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ СПЕЦИАЛЬНАЯ (СТО)

**НЕЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ СВЕТА ОТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛИ**

ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА 1881 г.

**ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

ЛЮБОЙ ПРОЦЕСС ПРОТЕКАЕТ ОДИНАКОВО

В СОСТОЯНИИ ПОКОЯ      И РАВНОМЕРНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

**ПРОСТРАНСТВО  $x, y, z$**   
ВЕРХ  $z > 0$     НАЗАД  $x < 0$   
ПРАВО  $y > 0$     ВЛЕВО  $y < 0$   
ВПЕРЕД  $x > 0$     НАЗАД  $x < 0$

ОТ ГАЛЛЕЯ К ЭЙНШТЕЙНУ

**ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ  $x, y, z, t$**   
ВЕРХ  $z > 0$     НАЗАД  $x < 0$   
ПРАВО  $y > 0$     ВЛЕВО  $y < 0$   
ВПЕРЕД  $x > 0$     НАЗАД  $x < 0$   
ПРОШЛОЕ  $t < 0$     БУДУЩЕЕ  $t > 0$

**ИНТЕРВАЛ ИНВАРИАНТЕН**

СОБЫТИЕ А      СОБЫТИЕ В

**ОДНОВРЕМЕННОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНА**

$c^2 t^2 = x^2 + y^2 + z^2 + \frac{v^2}{c^2} t^2$

**ЛОРЕНЦЕВО СОКРАЩЕНИЕ**

**ЗАМЕДЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ**

**ПОЯВЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

$\vec{H} = 0$      $\vec{E} \neq 0$        $\vec{H} \neq 0$      $\vec{E} \neq 0$

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

**СВЕТОВОЙ КОНУС**

**ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА**

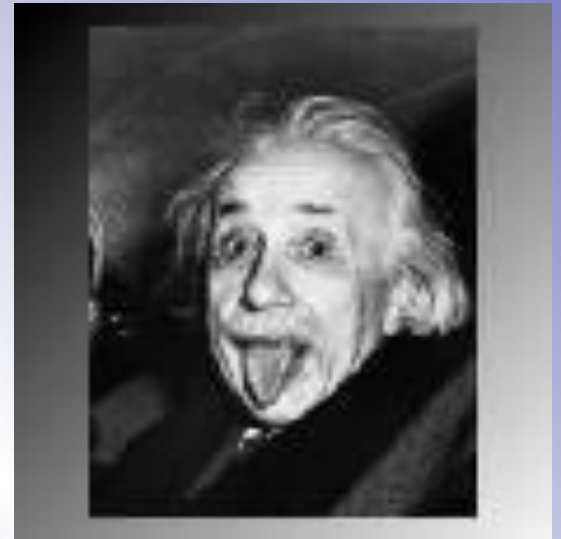
УДАЛЯЮЩИЙСЯ    НЕПОДВИЖНЫЙ    ПРИБЛИЖАЮЩИЙСЯ    НАБЛЮДАТЕЛЬ

**$E = mc^2$**

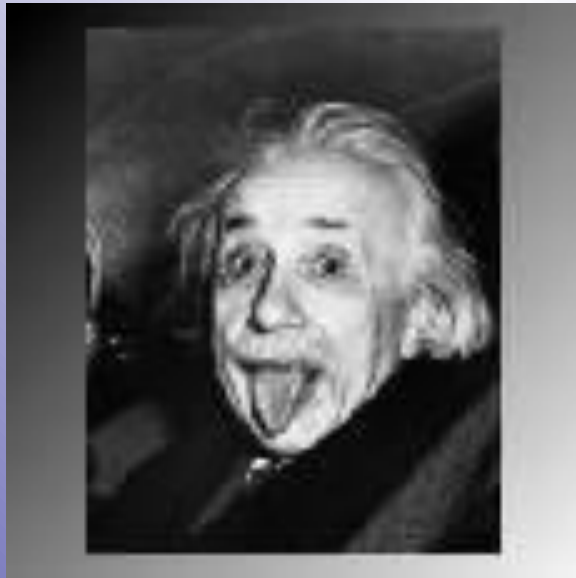


# Задание 1

- Два автомобиля движутся в противоположных направлениях со скоростями  $v_1$  и  $v_2$  относительно поверхности Земли. Чему равна скорость света от фар первого автомобиля в системе отсчета, связанной с другим автомобилем?
- $c + (v_1 + v_2)$
- $c - (v_1 - v_2)$
- $c - (v_1 + v_2)$
- $c - (v_1 - v_2)$
- $c$



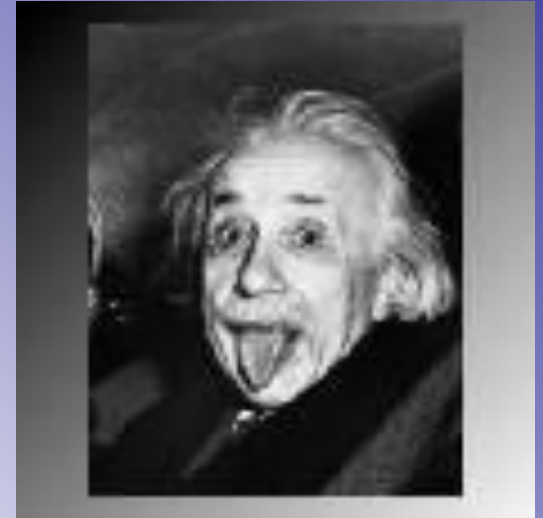
# Задание 2



- Панель дома массой 200 кг поднята на высоту 10 м. Как изменится при этом его масса?
- Не изменится
- Увеличится на  $0,22 \cdot 10^{-12}$  кг
- Уменьшится на  $0,22 \cdot 10^{-12}$  кг
- Для решения задачи не хватает данных



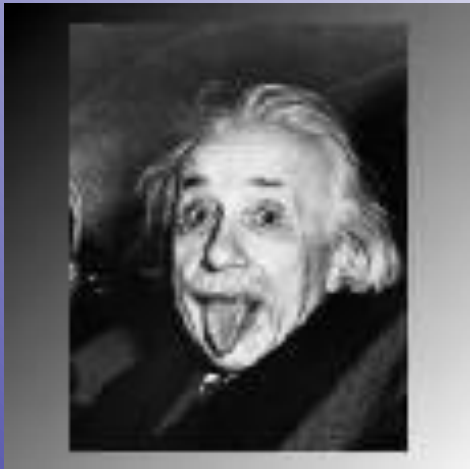
# Задание 3



- Опыты по наблюдению спектра водорода, находящегося в спектральной трубке, выполнялись дважды. Первый раз на Земле, второй раз в космическом корабле, движущемся относительно Земли с постоянной скоростью. Наблюдаемые спектры
- одинаковы
- существенно различны
- сходны, но все спектральные линии сдвинуты друг относительно друга

# Задание 4

- Рассчитайте отношение времени  $\tau$  в системе отсчета, движущейся со скоростью  $v = 1,5 \cdot 10^8$  м/с относительно лабораторной системы отсчета, к собственному времени  $\tau_0$ .

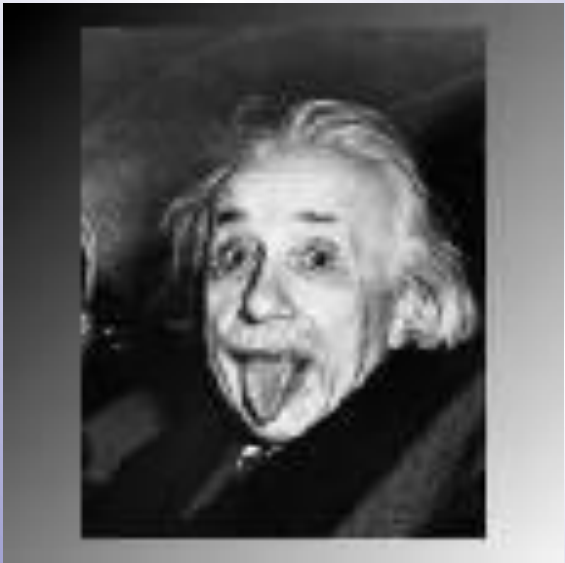


$$\frac{\tau}{\tau_0} = 0,866$$

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 1,15$$

$$\frac{\tau}{\tau_0} \approx 1$$

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 2$$



## Задание 5

- Найдите скорость  $u$  частицы, которой потребовалось бы на 2 года больше, чем световому импульсу, чтобы пройти расстояние в 6,0 световых лет до далекой звезды. Скорость частицы выразите в долях скорости света  $c$ .