

ЛЕКЦИЯ 8

21 октября 2011 года



СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ 8

Постулаты специальной теории относительности: принцип относительности Эйнштейна и принцип постоянства скорости света.

Формулы Лоренца для преобразований координат и времени при переходе от одной инерциальной системы к другой. Преобразование скоростей в релятивистской механике. Преобразование длин отрезков и промежутков времени. Пространственно-временной интервал (интервал между событиями).

Элементы релятивистской динамики. Релятивистское выражение для импульса. Релятивистское уравнение динамики МТ. Релятивистское выражение для энергии. Связь между энергией покоя и массой покоя.

8.1. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (СТО)

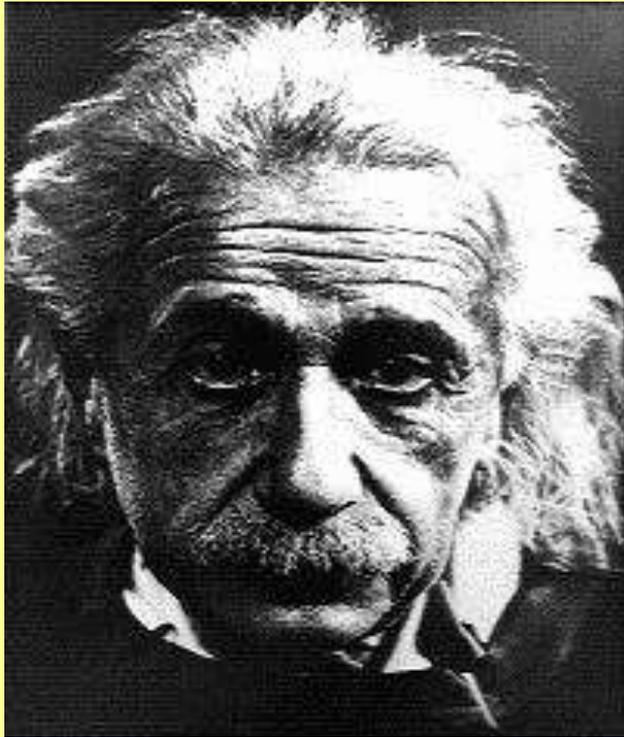
1905 год – Альберт Эйнштейн

Статья «К электродинамике движущихся тел»:

разработаны основы СТО, изложены новые законы движения, которые обобщали законы Ньютона и переходили в них при $v \ll c$.

Альберт Эйнштейн (Einstein)

(1879-1955)



Выдающийся физик-теоретик, один из основателей современной физики. Создал специальную (частную) (1905) и общую (1907-16) теории относительности.



- NOBEL
 - PHYSICS**
 - CHEMISTRY
 - MEDICINE
 - LITERATURE
 - PEACE
 - ECONOMICS
- LAUREATES ARTICLES EDUCATIONAL



The Nobel Prize in Physics 1921

"for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect"



Albert Einstein

Germany and Switzerland

Kaiser-Wilhelm-Institut (now Max-Planck-Institut) für Physik
Berlin, Germany

b. 1879
(in Ulm, Germany)
d. 1955

The Nobel Prize in Physics 1921

- Presentation Speech
- Albert Einstein**
- Biography
- Nobel Lecture
- Documentary
- Swedish Nobel Stamps
- Other Resources

1920 1922

- The 1921 Prize in:
- Physics
 - Chemistry
 - Physiology or Medicine
 - Literature
 - Peace

Find a Laureate:

Nobelprize.org
Get to know all 776 Prize
Winners! >

Explore & Learn!
Games and Simulations >

PLAY >

**Disarm the world of
nuclear weapons!** >

Постулаты СТО

- Первый постулат

Специальный принцип относительности, являющийся обобщением механического принципа относительности Галилея на любые физические явления:

В ЛЮБЫХ ИСО ВСЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ – МЕХАНИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ТЕПЛОВЫЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ – ПРОТЕКАЮТ ОДИНАКОВО.

Второй постулат

Принцип постоянства скорости света

Скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО и не зависит от движения источников и приемников света, т.е. одинакова во всех ИСО и равна $\approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

Специальный принцип относительности (другая формулировка)

Неизменность вида уравнений при замене в нем координат и времени одной СО координатами и временем другой СО называется **ИНВАРИАНТНОСТЬЮ** уравнений.

Другая формулировка принципа относительности:

УРАВНЕНИЯ, ВЫРАЖАЮЩИЕ ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ, ИНВАРИАНТНЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К ПРЕОБРАЗОВАНИЯМ КООРДИНАТ И ВРЕМЕНИ ОТ ОДНОЙ ИСО К ДРУГОЙ.

Оба постулата и сама СТО, построенная на их основе, привели к ломке многих установившихся классических понятий (абсолютное время, абсолютное пространство), заставили пересмотреть ряд основных положений классической физики Ньютона, установили новый взгляд на мир, новые пространственно-временные отношения (относительность длины, относительность одновременности событий).

Единое пространство-время

Постоянство скорости света \Rightarrow
пространство и время образуют **единое**
пространство-время.

Наиболее наглядно это проявляется
в виде воображаемого четырехмерного
пространства x, y, z, t (или ct).

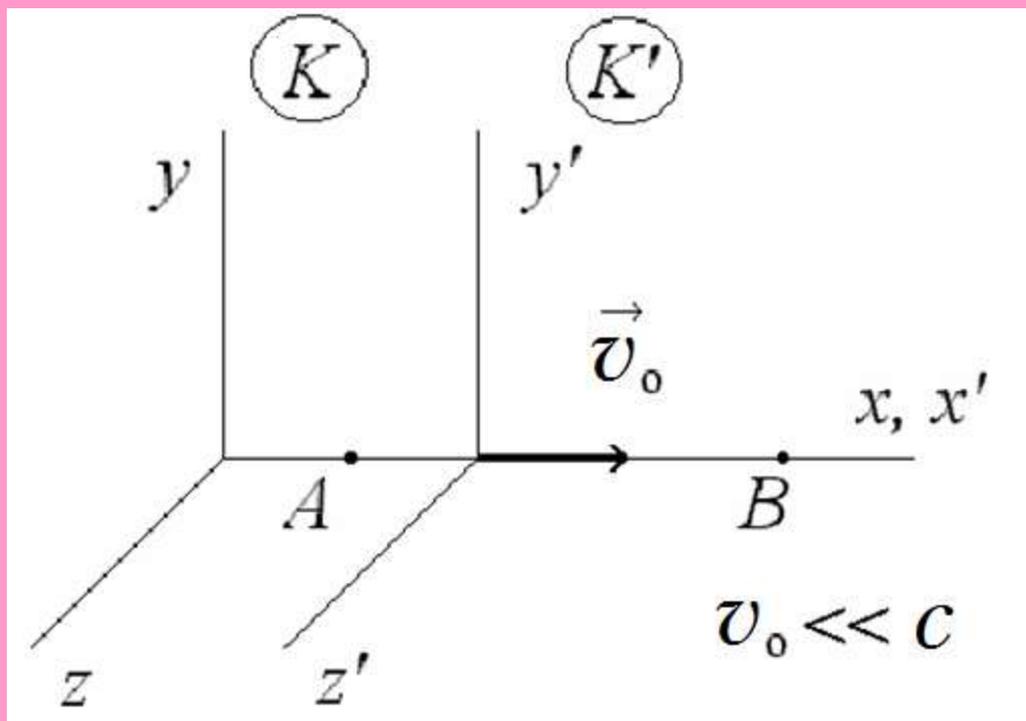
«Абсолютное, истинное, математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно», – писал Ньютон в *Математических началах натуральной философии* (*Philosophiæ naturalis principia mathematica*, 1687). Оно одно и то же в любой системе отсчета.

Это очень важно, поскольку, как будет показано далее, время существенным образом входит в законы движения.

Принцип относительности Галилея и преобразования Галилея

Преобразованиями Галилея называются преобразования координат и времени, применяемые в классической механике при переходе от одной ИСО $K(x, y, z, t)$ к другой $K'(x', y', z', t')$, которая движется относительно первой системы отсчета поступательно с постоянной скоростью.

Рис.4.1.



Введем преобразования Лоренца

Преобразованиями Лоренца называются **преобразования координат и времени**, применяемые в релятивистской механике при переходе от одной ИСО $K(x, y, z, t)$ к другой $K'(x', y', z', t')$, которая движется относительно первой системы отсчета поступательно с постоянной скоростью v_0 ($v_0 \sim c$).



The Nobel Prize in Physics 1902

"in recognition of the extraordinary service they rendered by their researches into the influence of magnetism upon radiation phenomena"



Hendrik Antoon Lorentz
1/2 of the prize
the Netherlands
Leiden University
Leiden, the Netherlands
b. 1853
d. 1928



Pieter Zeeman
1/2 of the prize
the Netherlands
Amsterdam University
Amsterdam, the Netherlands
b. 1865
d. 1943

The Nobel Prize in Physics 1902

- Presentation Speech
- Hendrik A. Lorentz**
 - Biography
 - Nobel Lecture
 - Banquet Speech
 - Swedish Nobel Stamps
- Pieter Zeeman**
 - Biography
 - Nobel Lecture
 - Swedish Nobel Stamps

1901 1903

- The 1902 Prize in:
- Physics
 - Chemistry
 - Physiology or Medicine
 - Literature
 - Peace

Find a Laureate:
Name GO

Nobelprize.org
Get to know all 776 Prize Winners! >

Explore & Learn!
Games and Simulations >

PLAY >

Disarm the world of nuclear weapons! >

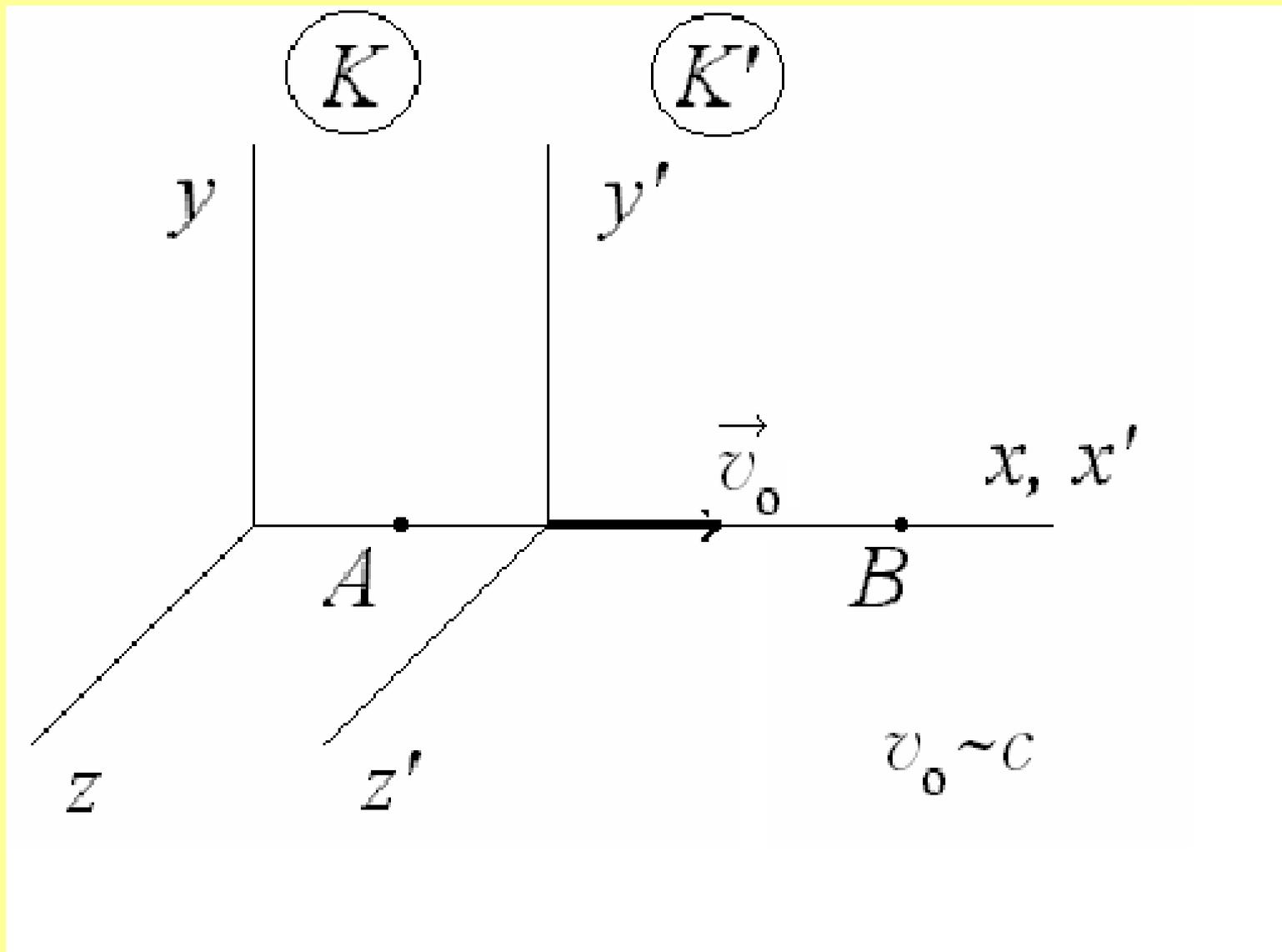


Рис.8.1

Преобразования Галилея ($K' \Rightarrow K$):

$$\begin{cases} x = x' + v_0 t' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = \gamma (x' + v_0 t') \\ y = y' \\ z = z' \end{cases}$$

(8.1)

$$\begin{cases} x = \gamma_1 (x' + v_0 t') \\ x' = \gamma_2 (x - v_0 t) \end{cases}$$

$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ – из равноправия систем

(8.2)

Для нахождения искомой величины используем принцип постоянства скорости света.

В начальный момент времени их начала координат совпадают. Пусть в момент времени $t=t'=0$ в направлении осей x и x' посылается световой сигнал, который производит вспышку на экране, расположенном в точке с координатой x в системе K и с координатой x' в системе K' .

Тогда:

$$x = ct, \quad x' = ct'.$$

Далее

$$\begin{cases} ct = \gamma(ct' + v_0 t') = \gamma(c + v_0)t' \\ ct' = \gamma(ct - v_0 t) = \gamma(c - v_0)t \end{cases} \quad \times$$

$$c^2 tt' = \gamma^2 (c + v_0)(c - v_0) tt' \Rightarrow c^2 = \gamma^2 (c^2 - v_0^2)$$

Итак:

$$\begin{aligned}\gamma^2 &= \frac{c^2}{c^2 - v_o^2} = \frac{\frac{c^2}{c^2}}{\frac{c^2 - v_o^2}{c^2}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{v_o}{c}\right)^2} = \\ &= \frac{1}{1 - \beta^2}, \quad \text{где } \beta = \frac{v_o}{c}.\end{aligned}\tag{8.3}$$

Таким образом, искомый коэффициент равен:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad . \quad (8.4)$$

Чтобы найти преобразования t :

$$\begin{cases} x = \gamma(x' + v_0 t') \\ x' = \gamma(x - v_0 t) \end{cases} \Rightarrow$$

$$x' = \gamma[\gamma(x' + v_0 t') - v_0 t] = \gamma^2(x' + v_0 t') - v_0 \gamma t$$

Далее, $t = \frac{\gamma^2(x' + v_0 t') - x'}{\gamma v_0} = \gamma \cdot \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \cdot \frac{x'}{v_0} + \gamma t'$

Искомое выражение:

$$t = \gamma \left[t' + \left(1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{x'}{v_0} \right]$$

(8.5)

Преобразования Лоренца ($K' \Rightarrow K$) ($v_0 \sim c$):

при $v_0 \ll c$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{v_0}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} x = x' + v_0 t' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{array} \right. \quad (8.6)$$

Иногда обозначают $v_0 = c\beta$

Обратные преобразования Лоренца

$$x = \frac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \Rightarrow x \cdot \sqrt{1 - \beta^2} =$$

$$= x' + v_0 \left[t \sqrt{1 - \beta^2} - \frac{v_0}{c^2} x' \right] \Rightarrow$$

$$x \cdot \sqrt{1 - \beta^2} = x' + v_0 t \sqrt{1 - \beta^2} - \beta^2 x' \Rightarrow$$

Обратные преобразования Лоренца

$$\Rightarrow x' (1 - \beta^2) = (x - v_0 t) \sqrt{1 - \beta^2} \Rightarrow$$

Итак,

$$x' = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8.7)$$

Обратные преобразования Лоренца

Аналогично,

$$t' = \frac{t - \left(\frac{v_0}{c^2}\right)x}{\sqrt{1 - \beta^2}} .$$

Вывод самостоятельно !

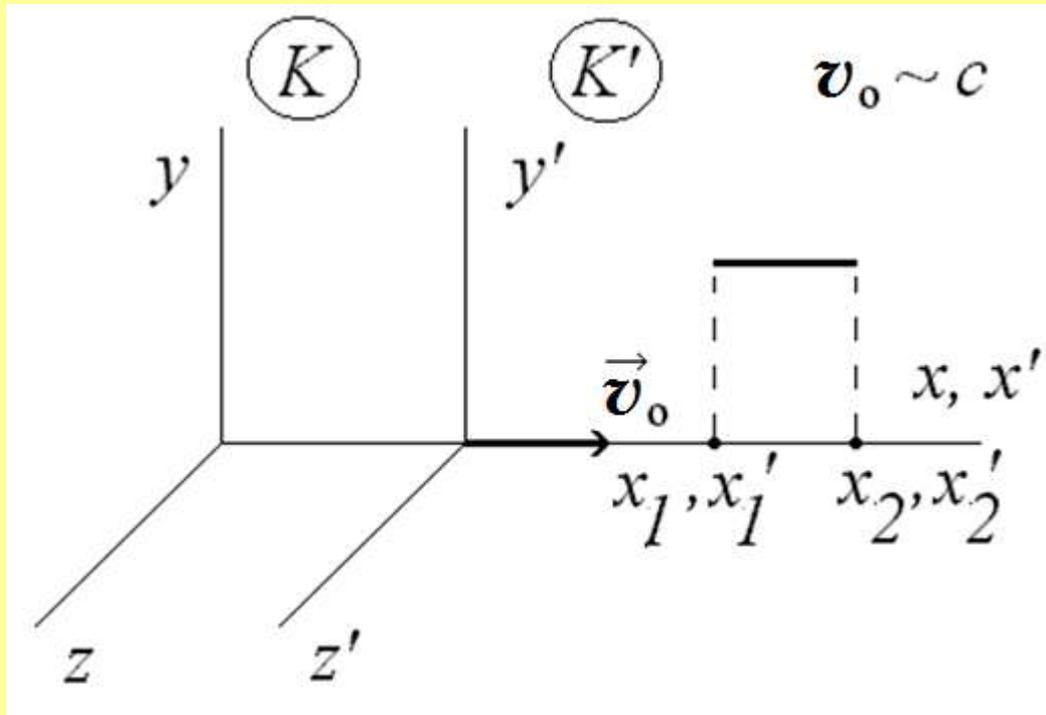
(8.8)

Таким образом, обратные преобразования Лоренца ($K \Rightarrow K'$):

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \left(\frac{v_0}{c^2} \right) x}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{array} \right. \quad (8.9)$$

Следствия из преобразований Лоренца

1). Длина тел в разных СО



$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \beta^2}$$

(8.10)

Следствия из преобразований Лоренца

2). Промежуток времени между событиями

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

(8.11)

Следствия из преобразований Лоренца

Пример. Мезон, входящий в состав космических лучей, движется со скоростью 95% скорости света. Какой промежуток времени Δt по часам неподвижного наблюдателя соответствует одной секунде «собственного времени» мезона?

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,95^2}} \approx 3,2 \text{ с.}$$

Сложение скоростей

$$v = \frac{v' + v_0}{1 + \frac{v_0 v'}{c^2}} \quad (8.12)$$

Если $v' = c$, то $v = \dots = c$.

ЗАДАНИЕ ПО ЛЕКЦИИ 8

Релятивистская динамика

- Релятивистское выражение для импульса
- Релятивистское выражение для энергии
- Преобразование импульса и энергии
- Взаимосвязь массы и энергии

Модуль 2

Молекулярная физика