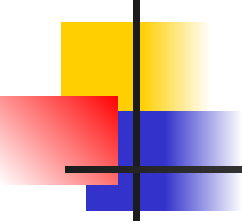


# СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (СТО)

- 
- 
- 1. Принцип относительности Галилея.  
Закон сложения скоростей
  - 2. Постулаты Эйнштейна
  - 3. Преобразования Лоренца
  - 4. Следствия из преобразований  
Лоренца
  - 5. Релятивистская механика
  - 6. Взаимосвязь массы и энергии покоя



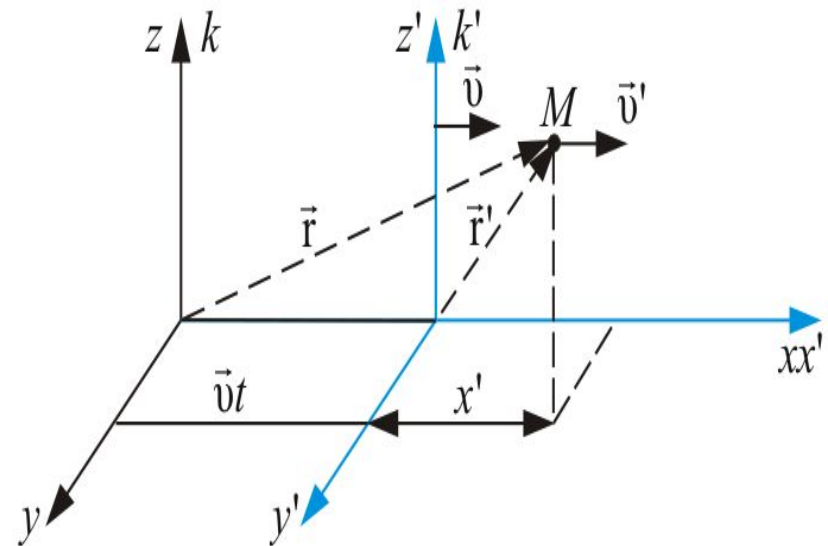
# Принцип относительности Галилея. Закон сложения скоростей

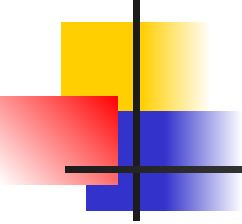
---

- При изложении механики предполагалось, что *механические явления происходят одинаково в двух системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга.*
- Это есть принцип относительности Галилея

# Преобразования Галилея координат, скорости и времени

- Рассмотрим две инерциальные системы отсчета  $k$  и  $k'$ . Система  $k'$  движется относительно  $k$  со скоростью вдоль оси  $x$ . Точка  $M$  движется в двух системах отсчета





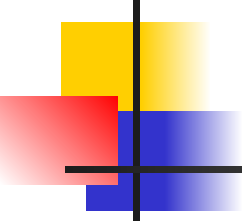
# Преобразования Галилея координат, скорости и времени

---

- Найдем связь между координатами точки  $M$  в обеих системах отсчета. Отсчет начнем, когда начала координат систем – совпадают, то есть  $t = t^1$ . Тогда:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{x}' + \mathbf{v}t \\ \mathbf{y} &= \mathbf{y}' \\ \mathbf{z} &= \mathbf{z}' \\ \mathbf{t} &= \mathbf{t}' \end{aligned} \right\}$$

- Совокупность уравнений называется *преобразованиями Галилея*.



# Преобразования Галилея координат, скорости и времени

---

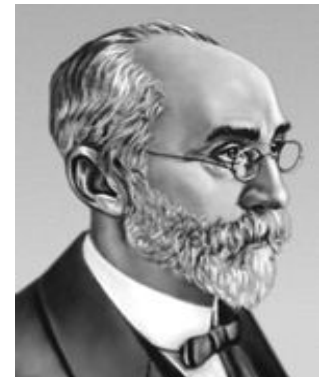
- В векторной форме преобразования Галилея можно записать так:  $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t$ .
- Продифференцируем это выражение по времени, получим:  $\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}'}{dt} + \vec{v}$
- Или  $\vec{v}_1 = \vec{v}' + \vec{v}$
- Это выражение определяет **закон сложения скоростей** в классической механике.

# Специальная теория относительности

- В 1905 г. в журнале «*Анналы физики*» вышла знаменитая статья А. Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел», в которой была изложена специальная теория относительности (СТО).
- В основе СТО лежат ***два постулата*** выдвинутых Эйнштейном.
  - ***1. Все законы природы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета.***
  - ***2. Скорость света в пустоте одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от скорости источника и приемника света.***

# Преобразования Лоренца

- Формулы преобразования при переходе из одной инерциальной системы в другую с учетом постулатов Эйнштейна предложил Лоренц в 1904 г.  
**Лоренц Хендрик Антон** (1853 – 1928) – нидерландский физик-теоретик, член многих академий наук, в том числе и АН СССР, лауреат Нобелевской премии.





# Преобразования Лоренца

---

- Лоренц установил связь между координатами и временем события в системах отсчета  $k$  и  $k'$  основываясь на тех экспериментальных фактах, что:
- *все инерциальные системы отсчета физически эквивалентны;*
- *скорость света в вакууме постоянна и конечна, во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от скорости движения источника и наблюдателя.*





# Преобразования Лоренца

- Таким образом, при больших скоростях движения сравнимых со скоростью света, Лоренц получил:

$x = \frac{x' + vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$	$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$
$y = y'$	$y' = y$
$z = z'$	$z' = z$
$t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$	$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$



# Преобразования Лоренца

---

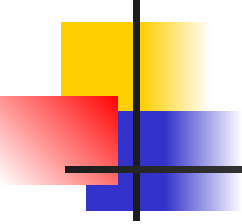
- Истинный физический смысл этих формул был впервые установлен Эйнштейном в 1905 г. в СТО.
- В теории относительности время иногда называют четвертым измерением. Точнее говоря, величина  $ct$ , имеющая ту же размерность, что и  $x, y, z$  ведет себя как четвертая пространственная координата.
- В теории относительности  $ct$  и  $x$  проявляют себя с математической точки зрения сходным образом.



# Преобразования Лоренца

---

- При малых скоростях движения или при бесконечной скорости распространения взаимодействий ( **теория дальнего действия** ) преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея ( **принцип соответствия** ).



# Следствия из преобразований Лоренца

## *Одновременность событий в СТО*

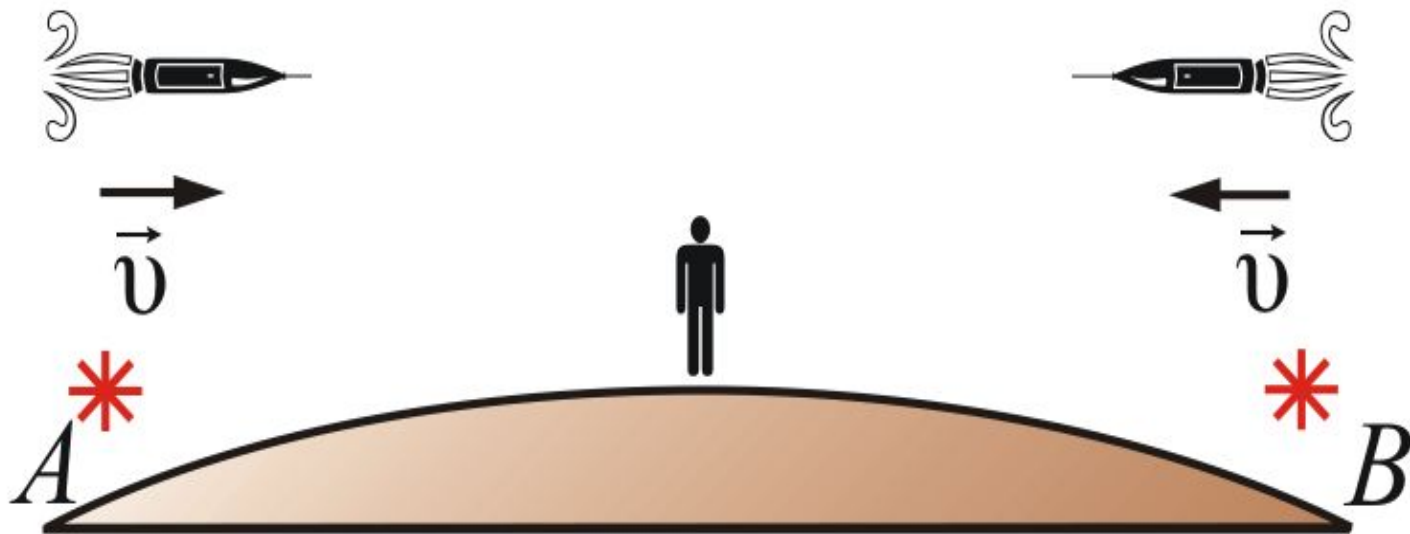
---

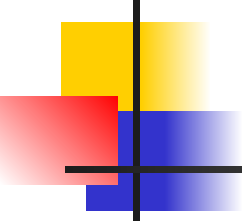
- *По Ньютону, если два события происходят одновременно, то это будет одновременно для любой системы отсчета (время абсолютно).*
- **Эйнштейн задумался, как доказать одновременность?**

# Следствия из преобразований Лоренца

## *Одновременность событий в СТО*

- Возьмем два источника света на Земле  $A$  и  $B$



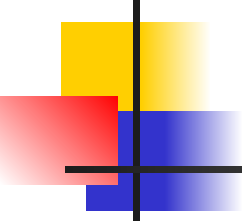


# Следствия из преобразований Лоренца

## *Одновременность событий в СТО*

---

- Если свет встретится на середине  $AB$ , то вспышки для человека находящегося на Земле, будут одновременны.
- Но со стороны пролетающих мимо космонавтов со скоростью  $u$  вспышки не будут казаться одновременными, т. к.  $c = \text{const}$ . Рассмотрим это более подробно.

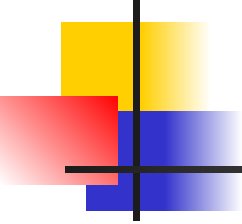


# Следствия из преобразований Лоренца

## *Одновременность событий в СТО*

---

- Пусть в системе  $k$  (на Земле) в точках  $x_1$  и  $x_2$  происходят одновременно два события в момент времени  $t_1 = t_2 = t$ .
- Будут ли эти события одновременны в  $k'$  (в пролетающей мимо ракете)?
- Для определения координат в  $k'$  воспользуемся преобразованиями Лоренца.



# Следствия из преобразований Лоренца

## *Одновременность событий в СТО*

---

- Получим:

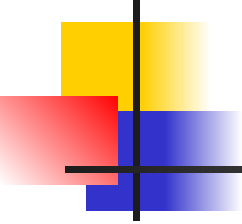
$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$t'_1 = \frac{t - \frac{vx_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$t'_2 = \frac{t - \frac{vx_2}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$





## Следствия из преобразований Лоренца

### *Одновременность событий в СТО*

---

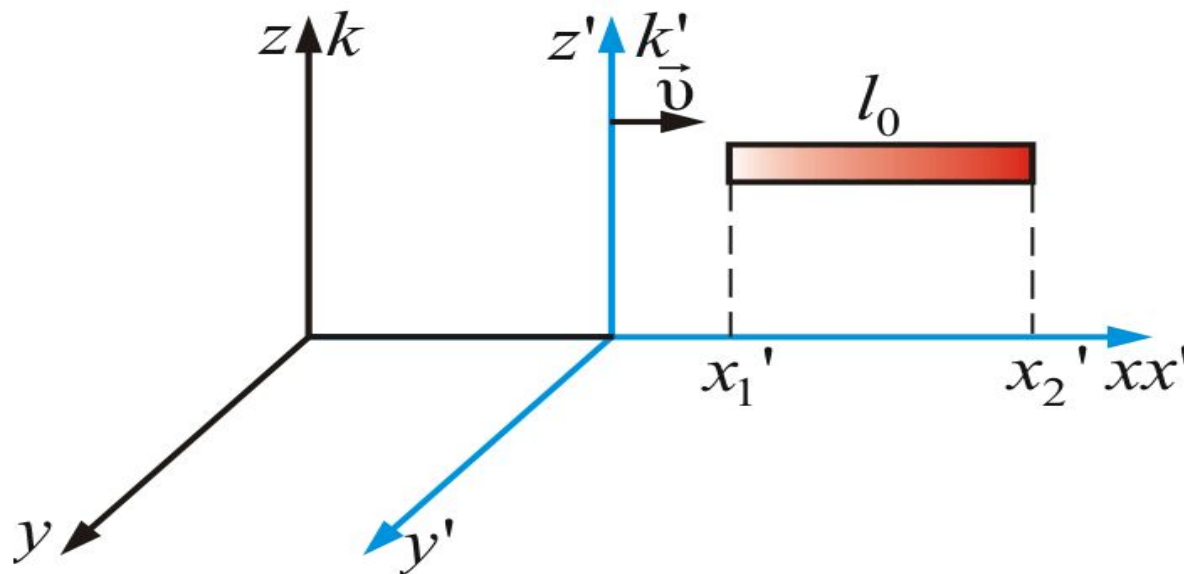
- Если события в системе  $k$  происходят одновременно в одном и том же месте, то и

$$x'_1 = x'_2$$

- т.е. и для  $k'$  эти события тоже одновременны.

## Лоренцево сокращение длины (длина тел в разных системах отсчета)

- Рассмотрим рисунок, на котором изображены две системы координат  $k$  и  $k'$





## *Лоренцево сокращение длины* (*длина тел в разных системах отсчета*)

---

- Пусть – *собственная длина тела* в системе, относительно которого тело неподвижно (например: в ракете движущейся со скоростью мимо неподвижной системы отсчета  $k$  (Земля)).
- Измерение координат  $x_1$  и  $x_2$  производим одновременно в системе  $k$ , т.е.  $t_1 = t_2 = t$ .



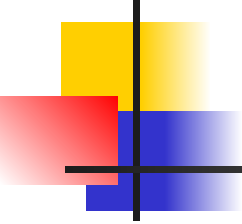
## Лоренцево сокращение длины (длина тел в разных системах отсчета)

- Используя преобразования Лоренца, для координат получим:

$$x'_2 - x'_1 = \frac{(x_2 - vt_2) - (x_1 - vt_1)}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \beta^2}};$$

- т.е. 
$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

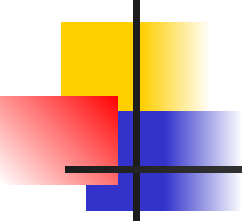
- Формула называется **Лоренцевым сокращением длины**. Собственная длина тела, есть максимальная длина. Длина движущегося тела короче, чем покоящегося. Причем, сокращается только проекция на ось  $x$ , т.е. размер тела вдоль направления движения.



## Замедление времени (длительность событий в разных системах отсчета)

---

- Пусть вспышка лампы на ракете длится  $\tau = t'_2 - t'_1$ , где  $\tau$  - *собственное время*, измеренное наблюдателем, движущимся вместе с часами.
- Чему равна длительность вспышки ( $t_2 - t_1$ ) с точки зрения человека находящегося на Земле, мимо которого пролетает ракета?



# Замедление времени (длительность событий в разных системах отсчета)

---

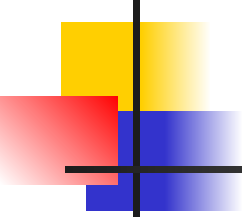
- Из преобразований Лоренца имеем:

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

- или

$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

- Из этого уравнения следует, что **собственное время – минимально (движущиеся часы идут медленнее покоящихся)**. Таким образом, вспышка на Земле будет казаться длиннее.
- Этот вывод имеет множество экспериментальных подтверждений.



# *Сложение скоростей в релятивистской механике*

---

- Пусть тело внутри космического корабля движется со скоростью

$$v' = 200\,000 \text{ км/с}$$

- **Сам корабль движется с такой же скоростью .**
- Чему равна скорость тела относительно Земли  $v_x$  ?



# Сложение скоростей в релятивистской механике

---

- **Классическая механика**

$$v_x = v' + V = 4 \cdot 10^5 \text{ км/с},$$

- **Но скорость света является предельной скоростью переноса информации, вещества и взаимодействий:  $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .**
- **Оценим скорость тела, используя преобразования Лоренца.**



# Сложение скоростей в релятивистской механике

- Внутри корабля перемещение  $dx'$  за время  $dt'$  равно  $dx' = v_x' dt'$ .
- Найдем  $dx$  и  $dt$  с точки зрения наблюдателя на Земле, исходя из преобразований Лоренца:

$$dx = \frac{v_x' dt' + V dt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad dy = dy'; \quad dz = dz';$$
$$dt = \frac{dt' + \frac{V v_x' dt'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

# Сложение скоростей в релятивистской механике

- Так как  $v_x = \frac{dx}{dt}$ , то:  $v_x = \frac{v_x' dt' + V dt'}{dt' + \frac{V v_x' dt'}{c^2}}$ ;

$$v_x = \frac{v_x' + V}{1 + \frac{V v_x'}{c^2}}$$

- Эта формула выражает **правило сложения скоростей** в релятивистской кинематике для  $x$  – вой компоненты.

# Сложение скоростей в релятивистской механике

- Для  $y$  – вой компоненты скорости, если движение частицы происходит не параллельно оси  $x$ , правило преобразования для  $v_y$  и  $v'_y$  следующее:

$$v_y = \frac{v'_y \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - v'_x \cdot V / c^2}$$

- Тогда скорость частицы в системе К:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$



# Релятивистская динамика

---

- **Релятивистский импульс**

$$p = m \frac{dx / dt}{\sqrt{1 - \beta^2}};$$

- **В векторной форме**

$$\mathbf{p} = \frac{m \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

- **Релятивистское выражение для полной энергии**

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



# Релятивистская динамика

---

- При  $v = 0$  , в системе координат, где частица покоится, **полная энергия равна энергии покоя:**

$$E_0 = m_0 c^2$$

- **Полная энергия складывается из энергии покоя и кинетической энергии ( $K$ ). Тогда**

$$K = E - E_0 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$$



# Релятивистская динамика

---

- **Соотношение, связывающее полную энергию с импульсом частицы.**

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

- **Это выражение, связывающее энергию и импульс является инвариантом.**
- **Закон *взаимосвязи массы и энергии* покоя и стало символом современной физики.**

$$\Delta E = c^2 \Delta m$$



# Релятивистская динамика

---

- **Основное уравнение динамики в релятивистском случае:**

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d}{dt} \cdot \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- **Из этого уравнения следует, что вектор ускорения частицы, в общем случае, не совпадает по направлению с вектором силы.**