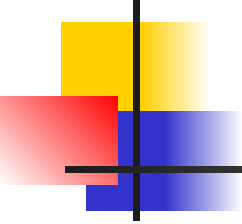
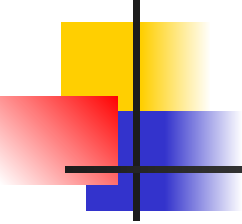


СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (СТО)

- 
-
- 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

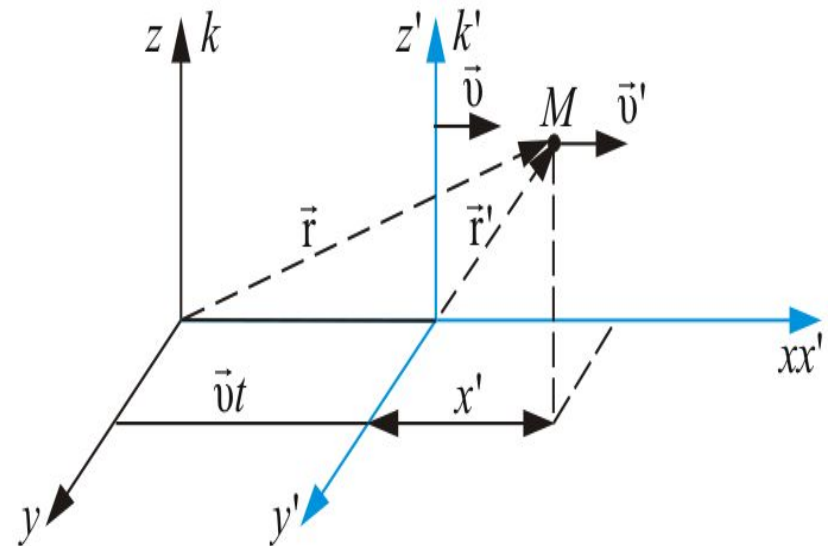


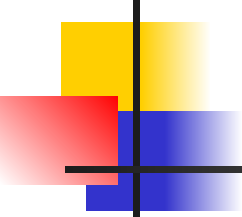
Принцип относительности Галилея. Закон сложения скоростей

- 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



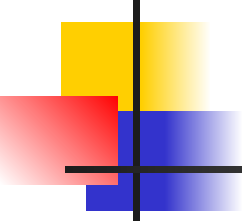


Преобразования Галилея координат, скорости и времени

- 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

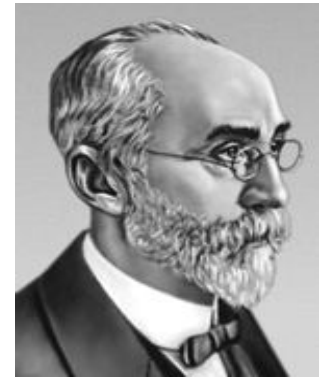
- В векторной форме преобразования Галилея можно записать так: $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t$.
- Продифференцируем это выражение по времени, получим: $\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}'}{dt} + \vec{v}$
- Или $\vec{v}_1 = \vec{v}' + \vec{v}$
- Это выражение определяет **закон сложения скоростей**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

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



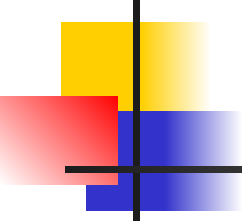
Преобразования Лоренца

- 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

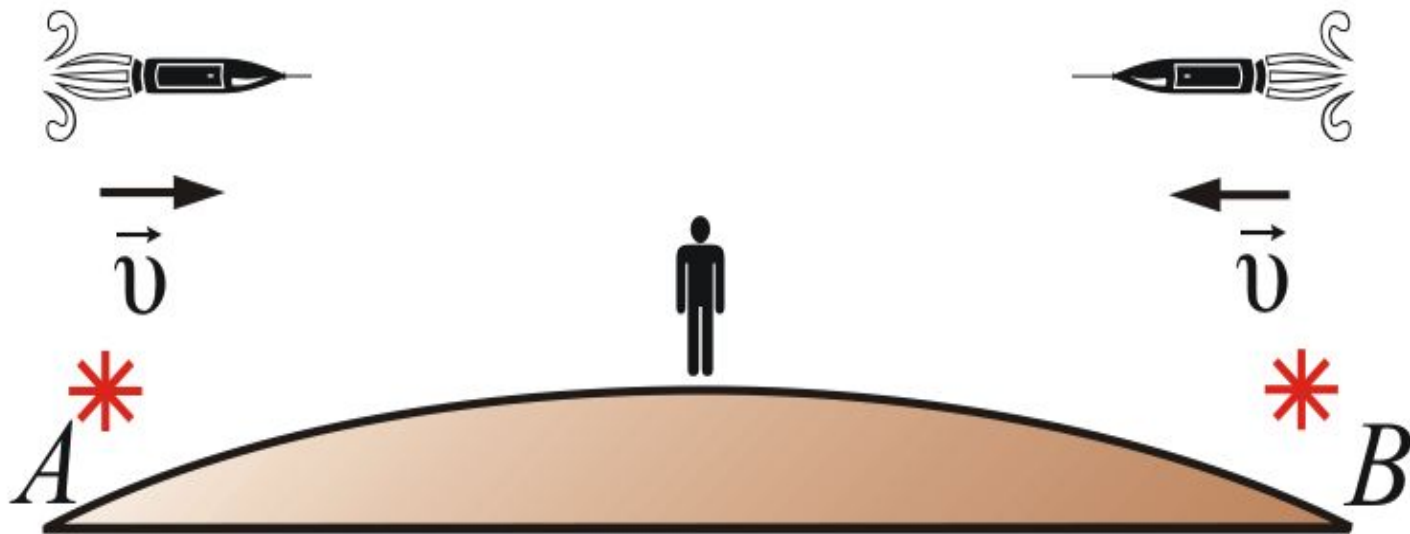
Одновременность событий в СТО

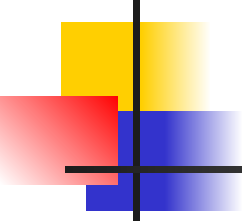
- *По Ньютону, если два события происходят одновременно, то это будет одновременно для любой системы отсчета (время абсолютно).*
- **Эйнштейн задумался, как доказать одновременность?**

Следствия из преобразований Лоренца

Одновременность событий в СТО

- Возьмем два источника света на Земле A и B

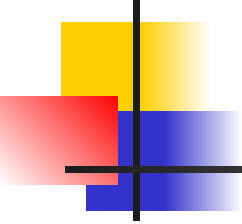




Следствия из преобразований Лоренца

Одновременность событий в СТО

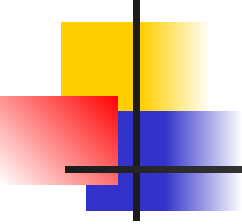
- Если свет встретится на середине AB , то вспышки для человека находящегося на Земле, будут одновременны.
- Но со стороны пролетающих мимо космонавтов со скоростью u вспышки не будут казаться одновременными, т. к. $c = \text{const}$. Рассмотрим это более подробно.



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

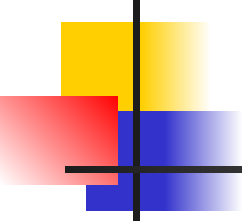
- Получим:

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

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

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

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



Следствия из преобразований Лоренца

Одновременность событий в СТО

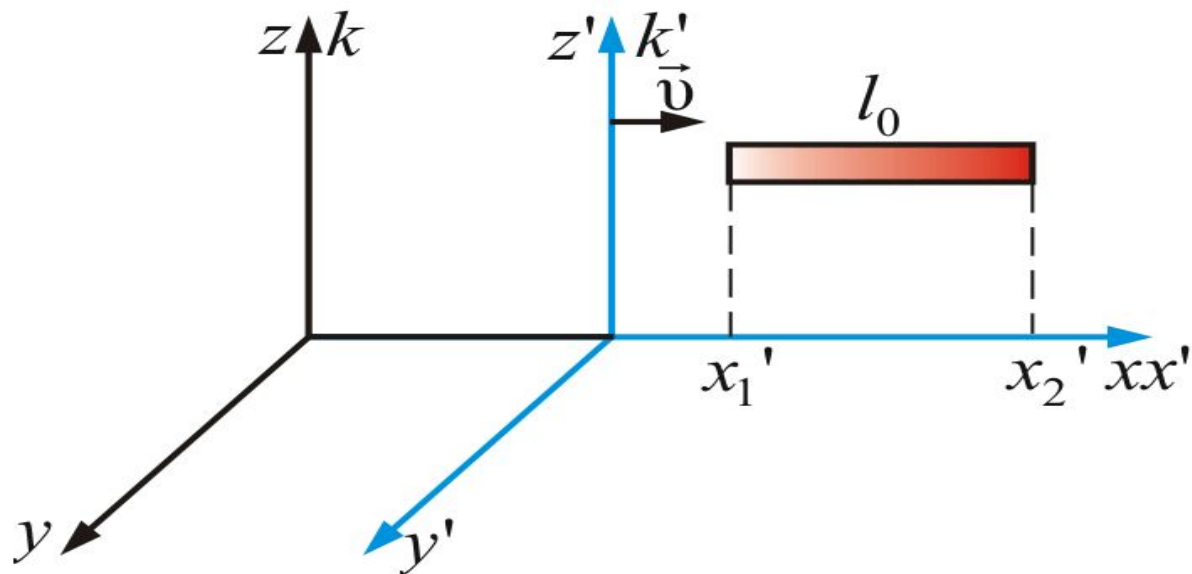
- Если события в системе k происходят одновременно в одном и том же месте, то и

$$x'_1 = x'_2$$

- 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. $t_1 = t_2 = t$.



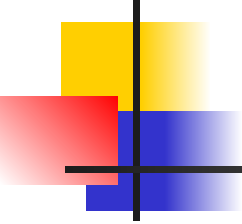
Лоренцево сокращение длины (длина тел в разных системах отсчета)

- Используя преобразования Лоренца, для координат получим:

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

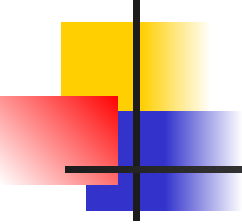
- т.е. $l_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - \beta^2}};$ $l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$

- 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 τ - **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.**