СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (СТО)

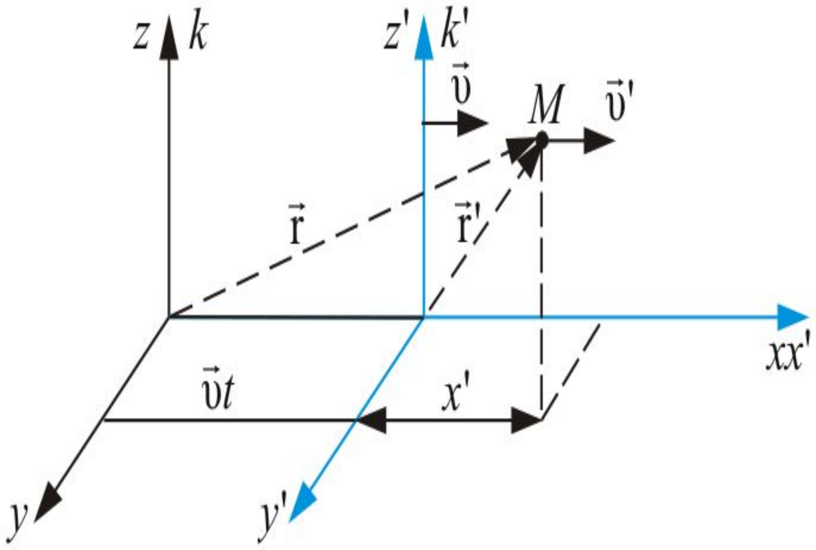
- 1. Принцип относительности Галилея. Закон сложения скоростей
- 2. Постулаты Эйнштейна
- 3. Преобразования Лоренца
- 4. Следствия из преобразований Лоренца
- 5. Релятивистская механика
- 6. Взаимосвязь массы и энергии покоя

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:**

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

- **Совокупность уравнений называется *преобразованиями Галилея.***

Преобразования Галилея координат, скорости и времени

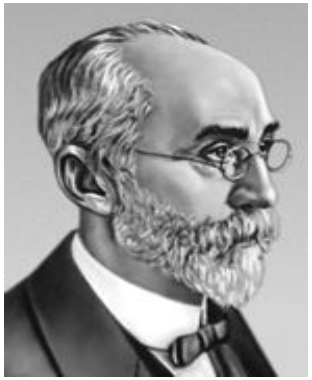
- В векторной форме преобразования Галилея можно записать так: $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{\upsilon}t.$
- Продифференцируем это выражение по времени, получим: $\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}'}{dt} + \vec{\upsilon}$
- Или $\vec{\upsilon}_1 = \vec{\upsilon}' + \vec{\upsilon}$
- Это выражение определяет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

$x = \dfrac{x' + \upsilon t}{\sqrt{1-\beta^2}}$	$x' = \dfrac{x - \upsilon t}{\sqrt{1-\beta^2}}$
$y = y'$	$y' = y$
$z = z'$	$z' = z$
$t = \dfrac{t' + \dfrac{\upsilon x'}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}$	$t' = \dfrac{t - \dfrac{\upsilon x}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}$

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 дальнодействия) преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея (*принцип соответствия*).

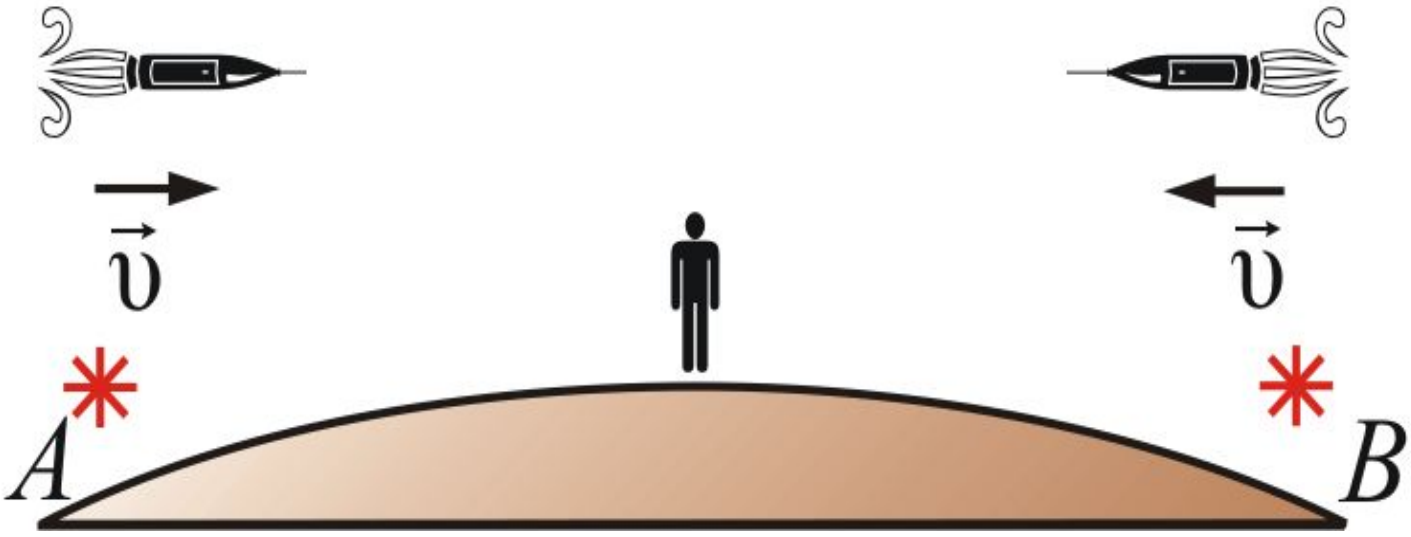
Следствия из преобразований Лоренца

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 *АВ*, то вспышки для человека находящегося на Земле, будут одновременны.**
- **Но со стороны пролетающих мимо космонавтов со скоростью υ вспышки не будут казаться одновременными, т. к. c=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:

$$x'_1 = \frac{x_1 - \upsilon t}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad x'_2 = \frac{x_2 - \upsilon t}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$t'_1 = \frac{t - \frac{\upsilon x_1}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad t'_2 = \frac{t - \frac{\upsilon x_2}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Следствия из преобразований Лоренца

Одновременность событий в СТО

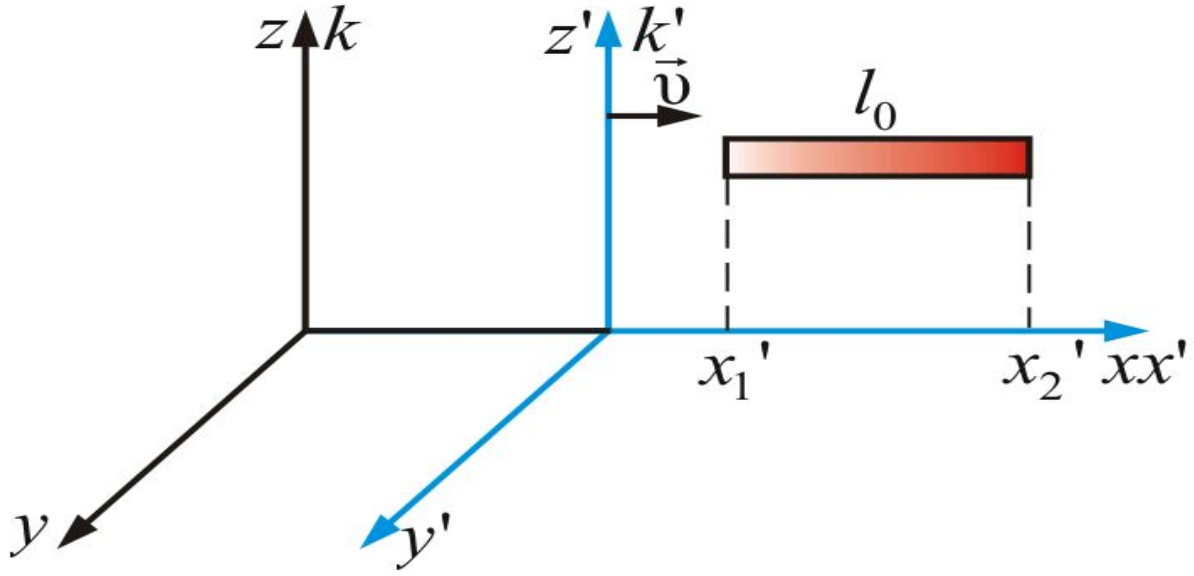
- Если события в системе *k* происходят одновременно в одном и том же месте, то и

$$x'_1 = x'_2$$

- 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:**

$$x'_2 - x'_1 = \frac{(x_2 - \upsilon t_2) - (x_1 - \upsilon t_1)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1-\beta^2}};$$

- **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

$$\upsilon' = 200\,000 \text{ км/с}$$

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

Сложение скоростей в релятивистской механике

- **Классическая механика**

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

- ***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 d*x'* за время d*t'* равно** $\mathrm{d}x' = \upsilon_x' \mathrm{d}t'$.
- **Найдем dx и d*t* с точки зрения наблюдателя на Земле, исходя из преобразований Лоренца:**

$$\mathrm{d}x = \frac{\upsilon_x' dt' + V\mathrm{d}t'}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \mathrm{d}y = \mathrm{d}y'; \qquad \mathrm{d}z = \mathrm{d}z';$$

$$\mathrm{d}t = \frac{\mathrm{d}t' + \dfrac{V\upsilon_x' \mathrm{d}t'}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Сложение скоростей в релятивистской механике

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

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

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

Сложение скоростей в релятивистской механике

- **Для у – вой компоненты скорости, если движение частицы происходит не параллельно оси х, правило преобразования для υ_y и υ_y' следующее:**

$$\upsilon_y = \frac{\upsilon_y' \cdot \sqrt{1-\beta^2}}{1-\upsilon_x' \cdot V / c^2}$$

- **Тогда скорость частицы в системе К:**

$$\upsilon = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2}$$

Релятивистская динамика

- **Релятивистский импульс**

$$p = m\frac{\mathrm{d}x/\mathrm{d}t}{\sqrt{1-\beta^2}};$$

- **В векторной форме**

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

- ***Релятивистское выражение для полной энергии***

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

Релятивистская динамика

- **При $\upsilon = 0$, 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:**

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

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