Раздел 2. Теория относительности.

Учебники: – Ипатова (т. 1).

– БКФ (т. 1)

– Матвеев (т. 1)

– Иродов („Основные законы механики").

– Паршин (Лекции I семестра).

§1. Принцип относительности Эйнштейна.

1) С. Т. О. – учение о том, что происходит в процессах при скоростях, близких к скорости света в инерциальных системах отсчёта. (1905 год)
Релятивистская механика в И. С. О.

2) О. Т. О. – –″– в неинерциальных системах отсчёта
Релятивистская теория гравитации. (1915 год)

В создании теории относительности большую роль также сыграли Г. А. Лоренц и А. Пуанкаре.

$c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с

$\beta = \frac{v}{c}$

Основные представления дорелятивистской физики о пространстве и времени.

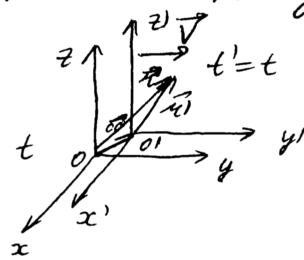
1) Пространство имеет 3-и измерения и описывается (подчиняется) Эвклидовой геометрии.

2) Наряду с пространством, независимо от него, существует время, которое связано с процессами (законами) движения.

3) Размеры тел одинаковы во всех И. С. О.

4) Действует закон Галилея (закон инерции), постулирующий о том что есть И. С. О. ($F = ma$ – справедливо только в И. С. О.).

5) Преобразование Галилея — переход из системы К в систему К', в которых время $t = t'$, и $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v_0}$; $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V}$



6) Принцип относительности Галилея (законы механики инвариантны относительно преобразований Галилея)

7) Принцип дальнодействия (принцип мгновенности распространения взаимодействия).

Опыт Майкельсона и Морли (1887) — экспериментальное обоснование того, что скорости движения Земли (тела) в мировом эфире нет (экспериментально скорости не обнаружено).

С.Т.О. — это пересмотр всех представлений классической физики о свойствах пространства и времени.

Принцип относительности Эйнштейна:

1) Расширение принципа относительности Галилея.

2) Постулаты о скорости света (С).

1) Законы природы, по которым происходит изменение состояния физических систем не зависит от того, в какой И.С.О. они находятся.

2) Скорость света в вакууме инвариантна во всех И.С.О., т.е. не зависит от скорости движения источника или приемника света.

Скорость света в вакууме является предельной скоростью распространения любого взаимодействия, т.е. любое взаимодействие передается с небесконечной скоростью, которая меньше или равна $3 \cdot 10^8$ м/с

§2. Скорость света.

1) Не зависит от частоты волн. (скорость света также есть скорость распространения электромагнитных волн).
2) инвариантна (const) во всех системах отсчёта.
3) предельная скорость распространения взаимодействия.
4) мировая константа

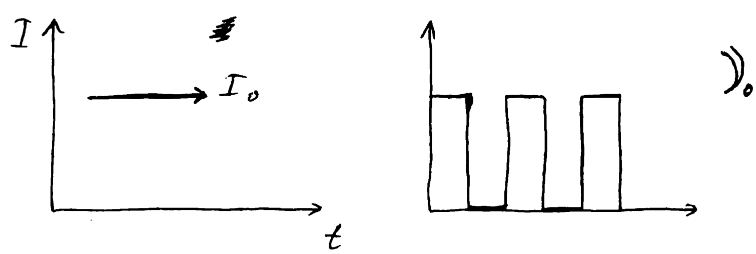
$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

Будем рассматривать:

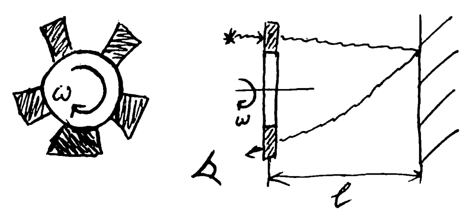
а) измерение скорости света.
б) предельность скорости света.
в) инвариантность скорости света.

Измерение скорости света.

Опыт Физо (использование техники модуляции).



(Графики интенсивности и график с использованием модуляции (модульный)).



$$t = \frac{2l}{c}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}\ ; \quad \frac{t}{T} = \frac{1}{n}$$

$$t = \frac{T}{n} = \frac{2\pi}{\omega}\cdot\frac{1}{n} = \frac{2l}{c}; \quad c = \frac{l n \omega}{\pi}$$

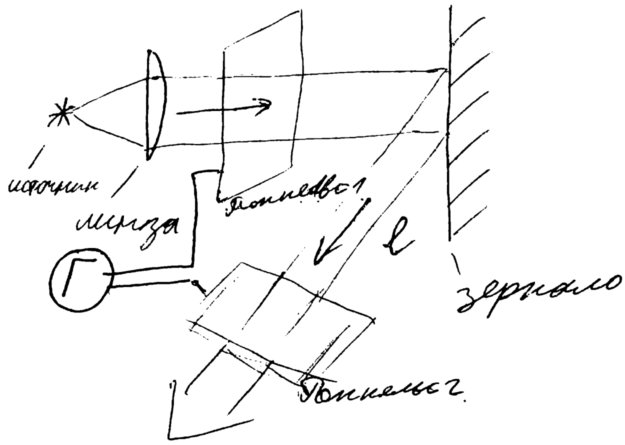
По данным Физо: $c = (298000 \pm 500)\ \frac{км}{с}$

25.10.10г.

1956 г — Бергстранд (опыт по определению скорости света).

Опыт основан на эффекте Покельса (с помощью которого можно делать принцип модуляции) (мод-ый метод).

(модуляционный метод)



$$\tau = \frac{2l}{c}$$

При опыте получено:

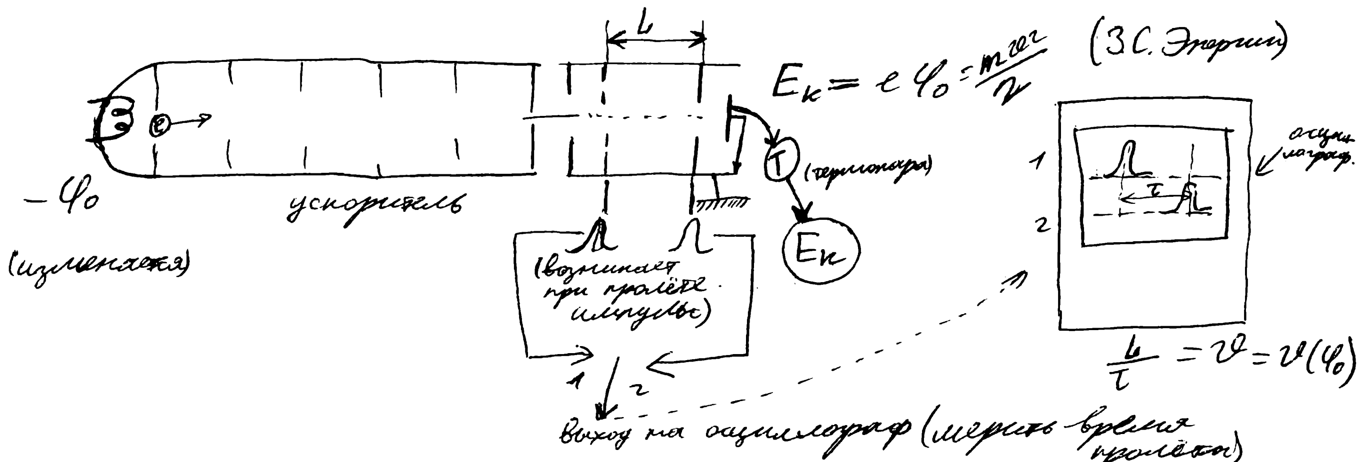
$$c = (299793{,}1 \pm 13{,}3)\ \text{км/с}$$

Экспериментальное значение скорости света:

$$c = (299792458{,}0 \pm 1{,}2)\ \text{м/с}$$

$$c_{\text{вакуума}} - c_{\text{возд}} = 91\ \text{км/с}$$

Предельная „c" (определил Бертоцци в 1964 году):



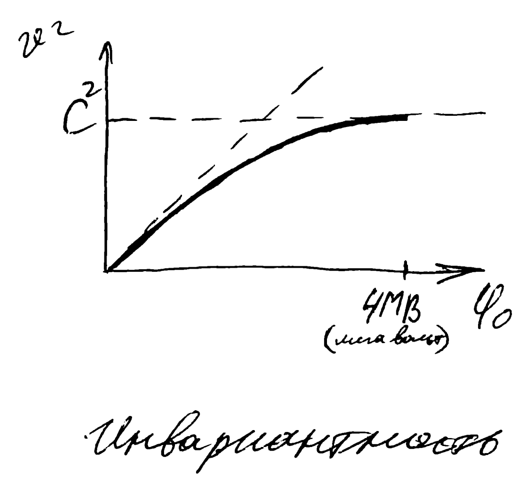
$$E_k = e\varphi_0 = \frac{mv^2}{2}$$ (З.С. Энергии)

$$\frac{L}{\tau} = v = v(\varphi_0)$$

независимо в опыте определяются скорость (v) и кин. энергия (E_k)

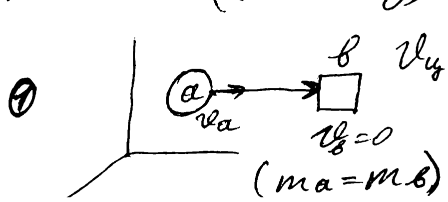
$$I = \frac{q}{t}$$

$$W \sim E_k$$ (мощность)



Инвариантность „c":

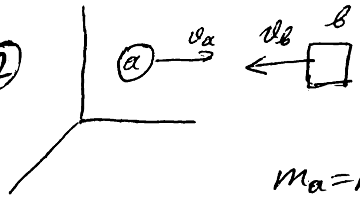
D. Sadeh (1963 год)



$$v_{ц.и.} = \frac{1}{2} v_a$$

Скорость центра инерции:

$$v_{ц.и.} = \frac{m_a v_a + m_b v_b}{m_a + m_b} = v_a \frac{m_a}{m_a + m_b}$$

② 

$$v_{ц.и.} = \frac{m_a v_a - m_b v_b}{m_a + m_b}$$

$$m_a = m_b$$

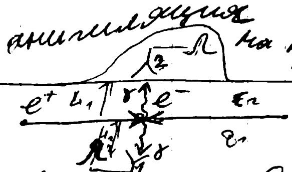
$$|v_a| = |v_b|$$

$$v_{ц.и.} = 0$$

Исследование аннигиляции e^+e^- в случае неподвижной мишени и в случае ~~неподвижных~~ встречных пучков (опыт D. Sadeh (a))

$$e^+ + e^- = 2\gamma$$

① $v_{ц.и.} = \frac{1}{2} v_a$ | аннигиляция на пробеге (*)



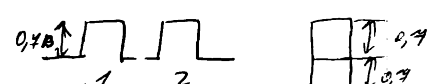
② $v_{ц.и.} = 0$ (встр. пучки)

$l_1 = l_2$; $\boxed{\tau_1 = \tau_2}$; $\boxed{v_{\gamma_1} = v_{\gamma_2}} \boxed{= c}$

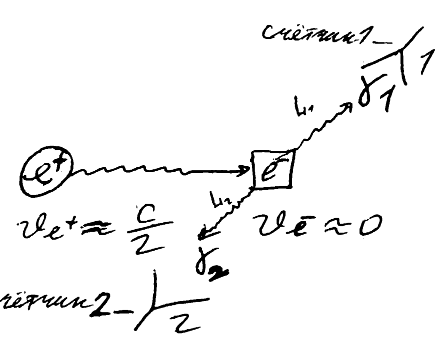
(гамма-кванты проходили через счётчики и создавали импульс).

$$v_{e^+} = v_{e^-} - \frac{c}{2}$$

$v_{источника} = 0$



(если время импульса совпадает, то сигнал проходит).

(*) 

$$l_1 = l_2$$

$$\tau_1 = \tau_2$$

$$v_{\gamma_1} = v_{\gamma_2} = c$$

$$v_{ист.} = \frac{c}{4}$$

Опыт экспериментально показывает инвариантность „c“!

§3. Преобразование Лоренца.

① Однородность пространства и времени:

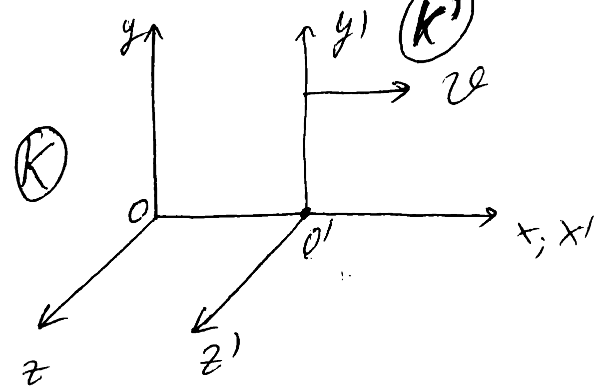
x, y, z, t − связь однозначна и линейна

(линейна и обратима).

② Использование принципа относительности: развитие события не зависит от системы отсчёта

③ Постоянство „c“ в всех системах отсчёта

Событие характеризуется: x, y, z, t.



а) Событие „1" – световая вспышка происходит в тот момент, когда совпадают точки O и O' и свет идёт вдоль оси X. ($y=y'=0$; $z=z'=0$).

в K: $x = ct$ $\quad x - ct = 0$ $\quad$ | $x' - ct' = \lambda(x - ct)$

в K': $x' = ct'$ $\quad x' - ct' = 0$ $\quad$ | $\lambda = const.$ ①

б) Событие „2" – произошла вспышка и свет идёт против оси X.

в K: $-x = ct$ $\quad x + ct = 0$ $\quad$ | $x' + ct' = \mu(x + ct)$

в K': $-x' = ct'$ $\quad x' + ct' = 0$ $\quad$ | $\mu = const$ ②

① + ②: $2x' = x(\lambda+\mu) - ct(\lambda-\mu)$

① − ②: $-2ct' = -ct(\lambda+\mu) + x(\lambda-\mu)$

$$\frac{\lambda+\mu}{2} = a\ ;\ \frac{\lambda-\mu}{2} = b$$

$$x' = ax - bct \quad ③$$

$$ct' = act - bx \quad ④$$

в) Рассмотрим движение точки O':

в K: $x = vt$ $\qquad$ в точке O': $x' = 0$

$$0 = ax - bct$$

$$x = \frac{b}{a}ct$$

$$\frac{b}{a}c = v\ ;\ \frac{b}{a} = \frac{v}{c} \quad ⑤$$

6.10.01 г) Пусть в (K') лежит неподвижно линейка длиной $\Delta x'=1$

из (K) в момент $t=0$:

из (3) $\Rightarrow$ $x'=ax$

$$\Delta x' = a\Delta x$$

$$\Delta x = \frac{1}{a}$$

д) Пусть в (K) неподвижно лежит линейка длиной $\Delta x=1$

из (K') в момент $t'=0$

из (4) $\Rightarrow$ $0 = act - bx$

$$t = \frac{b}{ac}x$$

(3) $$x' = ax - \frac{b^2 c}{ac}x$$

$$x' = ax\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right) \overset{(5)}{=} ax\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\Delta x' = a\underbrace{\Delta x}_{=1}\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right) = a\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)$$

„г)" и „д)": $$\frac{1}{a} = a\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$b \underset{(5)}{=} \frac{v}{c}a = \frac{v/c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Подставим „a" и „b" в (3) и (4):

$$x' = \frac{x - \frac{v}{c}ct}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{t - \frac{1}{c}\frac{v}{c}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$(y'=y;\ z'=z)$ (6)

$K \rightarrow K'$

При: $K' \rightarrow K$ $v \Rightarrow -v$

$$x = \frac{x'+vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t = \frac{t'+\frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$y = y'$

$z = z'$ (7)

(6) и (7) – преобразования Лоренца

1) если $c \to \infty$

$$\left.\begin{aligned} x' &= x - vt \\ t' &= t \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}\right\} \text{принцип Галилея.}$$

2) Нет ни одного сигнала, распространяющегося со скоростью, большей скорости света. (б) – x, t – мнимые. (x, t – комплексные) (что неверно).

3) пусть $v = c$. Такого быть не может!

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \to \infty$$

Световая сфера в (K) $\to$ $x^2+y^2+z^2=c^2t^2$; $c^2t^2-x^2-y^2-z^2=0$

$\Updownarrow$ инвариантно

Световая сфера в (K') $\to$ $x'^2+y'^2+z'^2=c^2t'^2$; $c^2t'^2-x'^2-y'^2-z'^2=0$

Преобразования Лоренца обеспечивают инвариантность при переходе световой сферы из одной системы в другую.

$$ct^2-x^2-y^2-z^2 = ct'^2-x'^2-y'^2-z'^2$$

пространственно-временной интервал „S"

$$S^2 = S'^2$$

Относительность понятия „одновременность" в различных инерциальных системах отсчёта.

в (K)-системе: в точке $A_1(x_1; y_1; z_1)$ и в точке $A_2(x_2; y_2; z_2)$ произошло одновременно 2-а события $(t_1=t_2)$ $(t_2-t_1=0)$

в (K'): $t_1' = \dfrac{t_1-\frac{v}{c^2}x_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

$t_2' = \dfrac{t_2-\frac{v}{c^2}x_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

$$t_2'-t_1' = \frac{(t_2-t_1)-\frac{v}{c^2}(x_2-x_1)}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$t_2'-t_1' \neq 0$, т.к. $x_2-x_1 \neq 0$

Физической причиной неодновременности является конечность скорости света.

§4. Свойства движущихся масштабов и часов.

Релятивистское сокращение длины.

$l_0 = x_2' - x_1'$, $y' = z' = 0$ | в системе (K')

Для измерения длины l надо в один и тот же момент времени $t_2 = t_1$ определить координаты начала и конца линейки x_2 и x_1 (т.е. сфотографировать): $l = x_2 - x_1$ (в (K) - системе).

$$\underbrace{x_2' - x_1'}_{l_0} = \frac{(x_2 - x_1) - v\overbrace{(t_2 - t_1)}^{=0}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\underset{\substack{\text{движущийся} \\ \text{отн. наблю-} \\ \text{дателя}}}{l} = \underset{\substack{\text{неподвижно} \\ \text{отн. наблюдателя}}}{l_0}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1)$$ – релятивистское сокращение длины.

l_0 – собственная длина, τ – собственное время (K')

l – " –, t – " – (K)

парадокс будет если взять l_0 и t или l и τ (т.е. собственную длину и собственное время из разных систем).

Релятивистское замедление времени (т.е. удлинение промежутка времени между одними и теми же событиями).

в (K) в точке $x_1 = x_2$

$\Delta t_0 = t_2 - t_1 = \tau$

по часам (K')-системы:

$$\underbrace{\Delta t' = t_2' - t_1'}_{\Delta t} = \frac{\overbrace{(t_2 - t_1)}^{\tau}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

1.11.10г.

(K)→(K') $y = y'$

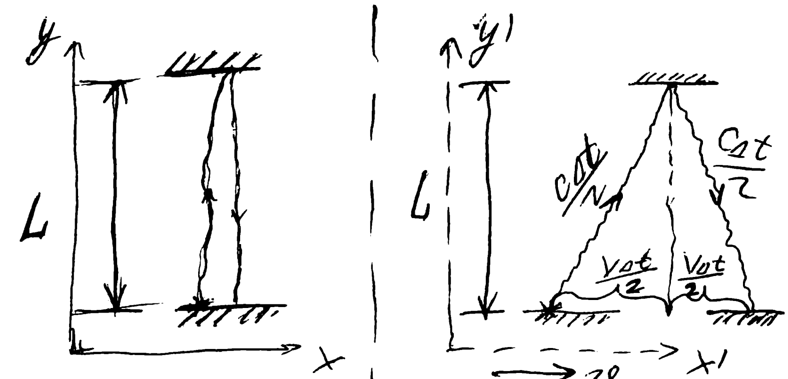
$z = z'$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \quad (1)$$

$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$



Земля $\tau = \frac{2L}{c}$ | На ракете (с точки зрения Земли).

$$L^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2$$

$$L^2 = \left(\frac{c\tau}{2}\right)^2$$

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

В 1972 году Китинг и Хафеле провели эксперимент:

с авиабазы в США полетел самолёт вокруг Земли и после приземления сравнили время на часах на Земле и в самолёте:

0 неподвижные часы: $v \sim \omega_{земли}$

2 движ. часы: $\Delta v = v_{самолёта}$ | $v \sim \omega_{земли} + v_{самолёта}$ (движ. на восток)

1' неподв. часы.

(2) движение на запад:

$\Delta v > v_{самолёта}$ | $v \sim \omega_{Земли} - v_{самолёта}$

Сравнение дало что движ. часы отстали. Экспериментальное отставание: $(273 \pm 7) \cdot 10^{-9}$ с. По теории получается: $(275 \pm 2) \cdot 10^{-9}$ с.

Т.е. экспериментально получено что движущиеся часы отстают.

Распад мезона.

в О-системе в лаборатории.

$\tau_{\mu^+} = 2 \cdot 10^{-6}$ с — время жизни мезона. (мезон — нестабильные частицы).

$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$

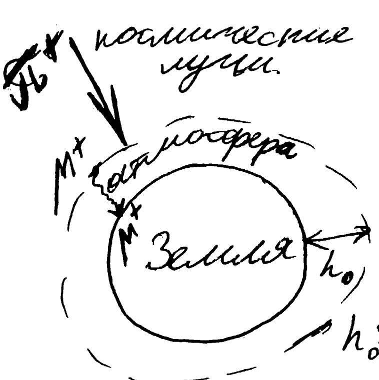
$\mu^+ \to e^+ + 2\nu_e$

$\tau = 2 \cdot 10^{-6}$ с

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с

$c\tau = 600$ м.

(за существование частица мезона даже при скорости света пройдет не более 600 м).



$h_0 \approx 10$ км.

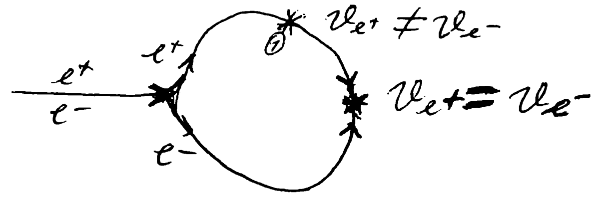
с точки зрения μ^+-мезона: $\tau = 2 \cdot 10^{-6}$ с

$h = h_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \ll 10$ км (≤ 600 м).

с точки зрения Земли: $h_0 = 10$ км;

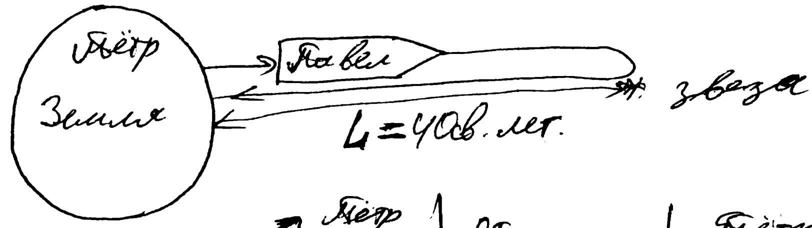
$\Delta t = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \gg \tau$

Ускоритель:



точка встречи имеет $v=0$.

① - перемещённая точка встречи, тогда точка встречи имеет $v \neq 0$.



$L = 40$ св. лет
$v = 0{,}99c$ } с точки зрения Земли

Старт: $t_0 = 20$ лет.

Близнецы → Пётр, → Павел | Стало по 20 лет | Пётр остается на Земле, Павел полетел к звезде и обратно.

Каков будет возраст Петра и Павла при встрече?

С точки зрения Петра: его возраст:

возраст Петра при встрече: $\Delta t = \frac{2L}{c} + 20 = 80{,}8 + 20 =$
$= 100{,}8$ лет

возраст Павла: $\Delta t = 20 + \frac{2L}{c} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 20 + 80{,}8 \cdot 0{,}141 =$
$= 31{,}4$ года

С точки зрения Павла:

путь до звезды: $l = L\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 5{,}64$ св. года.

всё путешествие: $\Delta t' = \frac{5{,}64 \cdot 2}{c} = 11{,}4$ года.

(возраст Павла 31,4 года)

С точки зрения Павла как бы двигался Пётр.

Парадокса нет, ибо задача имеет место быть, т.к. в задаче есть внутренняя асимметрия.

Формулы С.Т.О. работают (применимы) для

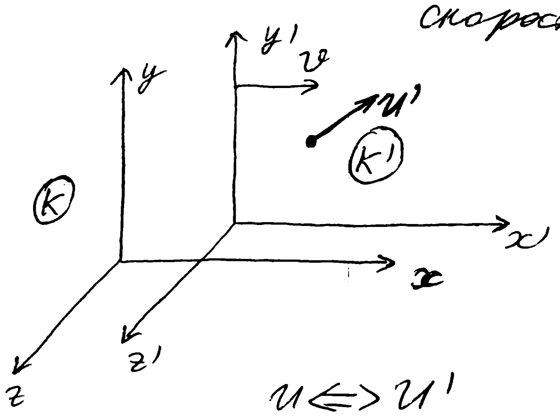
а) равномерного движения по ~~окружности~~;

б) ускорение и замедление происходят в очень малые промежутки времени.

02.11.10г.

$$\left.\begin{aligned} y' &= y \\ z' &= z \\ x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\ ;\quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned}\right\}$$

§5. Релятивистский закон сложения скоростей.



$u \Leftrightarrow u'$

(K'):	(K):
$u_x' = \frac{dx'}{dt'}$	$u_x = \frac{dx}{dt}$
$u_y' = \frac{dy'}{dt'}$	$u_y = \frac{dy}{dt}$
$u_z' = \frac{dz'}{dt'}$	$u_z = \frac{dz}{dt}$

$$\left.\begin{aligned} dy' &= dy \\ dz' &= dz \\ dx' &= \frac{dx - v\,dt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \\ dt' &= \frac{dt - v\,dx}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned}\right\} \quad 1$$

K → K'

2

$$\left\{\begin{aligned} u_x' &= \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - v\,dt}{dt - \frac{v}{c^2}dx} \quad /:dt \ \text{(правую часть)} \\ \underline{u_x'} &= \frac{u_x - v}{1-\frac{v}{c^2}u_x} \\ u_y' &= \frac{dy\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{dt - \frac{v}{c^2}dx} \quad /:dt \ \text{(правую часть)} \\ \underline{u_y'} &= \frac{u_y\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{1-\frac{v}{c^2}u_x} \\ u_z' &= \frac{dz\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{dt - \frac{v}{c^2}dx} \quad /:dt \ \text{(правую часть)} \\ \underline{u_z'} &= \frac{u_z\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{1-\frac{v}{c^2}u_x} \end{aligned}\right.$$

K' → K

3

$$\left\{\begin{aligned} u_x &= \frac{u_x' + v}{1+\frac{v}{c^2}u_x'} \\ u_y &= \frac{u_y'\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}}{1+\frac{v}{c^2}u_x'} \\ u_z &= \frac{u_z'\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}}}{1+\frac{v}{c^2}u_x'} \end{aligned}\right.$$

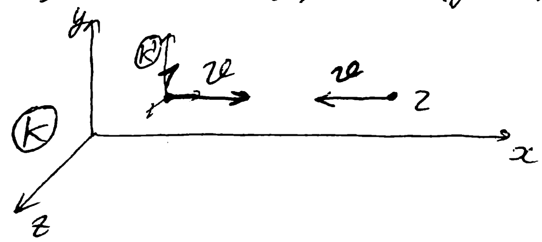
Примеры:

1) Допустим в K-системе свет идёт вдоль x:

$u_y = u_z = 0$; $u_x = c$.

Из формул ②: $u_y' = u_z' = 0$, $u_x' = \frac{c - v}{1 - \frac{v}{c^2}\cdot c} = c\frac{c-v}{c-v} = c$.

2) коллайдеры (ускорители на встречных пучках).



Скорость сближения в системе K $2v$.

Каковы относительные скорости?

Расположим K'-систему, связанную с частицей 1.

в K: $u_{x1} = v$; $v_{x2} = -v$

$u_{y12} = u_{z12} = 0$

в K': $V = v$ (по формулам ②)

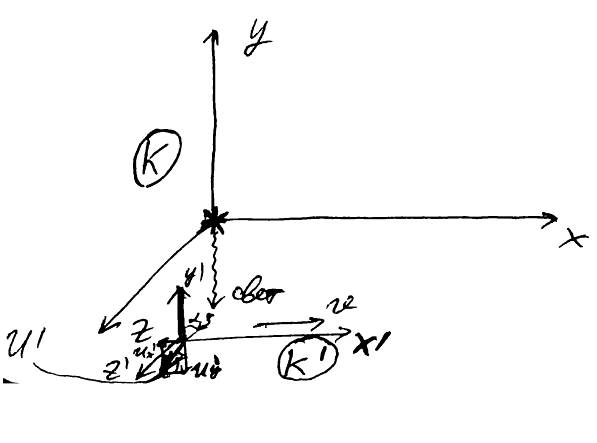
$u_{y'12} = u_{z'12} = 0$

$u'_x = \frac{-v - v}{1 - \frac{v}{c^2}(-v)} = \frac{-2v}{1+\frac{v^2}{c^2}}$ (скорость частицы 2 относительно частицы 1).

пусть скорости v — достаточно велики, допустим $v = 0{,}6\,c$.

$u'_x = -\frac{1{,}2c}{1+0{,}36} = -0{,}88\,c$

3) аберрация света (впервые этот эффект использовал Брэдли).



$u_x = 0$; $u_z = 0$; $u_y = -c$.

$u_x' = \frac{0 - v}{1 - \frac{v}{c^2}\cdot 0} = -v$

$u_y' = \frac{-c\cdot\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c^2}\cdot 0} = -c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$

$u_z' = 0$

свет пойдёт под углом α.

$$tg\,\alpha = \frac{u_x'}{u_y'} = \frac{v}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\ ;\ tg\,\alpha \approx \frac{v}{c}$$

$$u' = \sqrt{(u_x')^2 + (u_y')^2} = \sqrt{\cancel{v^2} + c^2 - \frac{\cancel{v^2}}{\cancel{c^2}}\cdot \cancel{c^2}} =$$

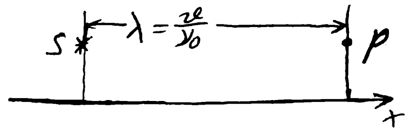
$$= \sqrt{c^2} = c.$$

§6. Доплер. Эффект Доплера.

В 1845 году - его нашли в акустике

В 1867 году - его нашли в оптике.

1) Акустический эффект Доплера:

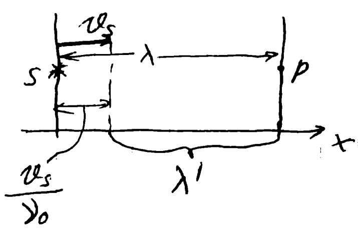


S - источник звука

Источник звука выдаёт звуковой сигнал, период которого $T_0 = \frac{1}{\nu_0}$

v - скорость звука ($v \approx 330$ м/с)

λ - длина волны звука; $\lambda = vT_0 = \frac{v}{\nu_0}$



а) источник движется со скоростью „v_s", а приёмник неподвижен:

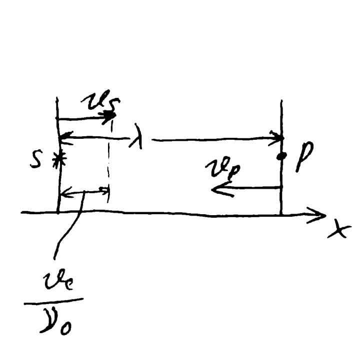
$$\lambda' = vT_0 - v_sT_0 = T_0(v - v_s) = \frac{v - v_s}{\nu_0}$$

$$\nu' = \frac{v}{\lambda'} = \nu_0\frac{v}{v - v_s} = \nu_0\frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}$$

если $\frac{v_s}{v} \ll 1$, то $\nu' \approx \nu_0(1 + \frac{v_s}{v})$ (1)

v - скорость звука в среде

v_s - скорость источника звука относительно среды.



б) приёмник движется навстречу источнику также со скоростью v_p.

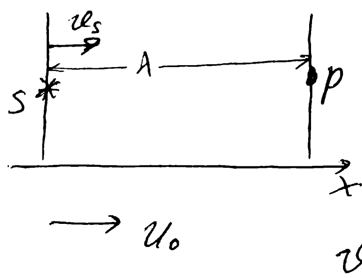
в формуле (1): $\nu' = \nu_0\frac{v + v_p}{v - v_s}$

v_p - скорость приёмника относительно среды.

~~Проекции~~ скорости надо брать в проекциях на ось X:

$$v \to v_x, \quad v_p \to v_{px} \to -v_{px}$$
$$\downarrow$$
$$v \qquad v_p \to v_{sx} \to +v_{sx}$$

$$\nu' = \nu_0 \frac{v - v_{px}}{v - v_{sx}} \quad (2)$$



в) приёмник неподвижен, но ветер дует в сторону приёмника со скоростью u_0, и движется источник.

v_{px} — скорость приёмника относительно среды.

$v_{px} = -u_0$

$v_{sx} = v_s - u_0$

по формуле (2): $\nu' = \nu_0 \frac{v + u_0}{v - v_s + u_0} =$ (3)

$$= \nu_0 \frac{v + u_0}{(v + u_0) - v_s}$$

Сравним (3) и (1); т.е. фактически скорость волны как бы различается в движущейся и в неподвижной среде.

Физо установил, что свет частично увлекается диэлектрической средой (коэффициент увлечения „$1-\frac{1}{n^2}$").

08.10.10г.

$$t' = \frac{t - v x \frac{1}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

(1) $\nu' = \nu_0 \frac{v}{v - v_s} = \nu_0\left(1 + \frac{v_s}{v}\right)$

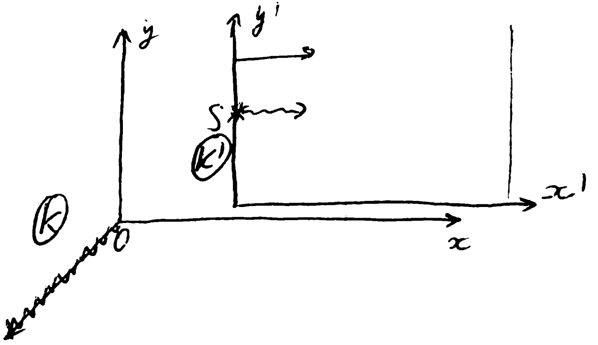
(2) $\nu' = \nu_0 \frac{v - v_{px}}{v - v_{sx}}$

(3) $\nu' = \nu_0 \frac{v + u_0}{(v + u_0) - v_s}$

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \quad l = l_0 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}.$$

Исключением влияние среды является скорость света в вакууме, она всегда постоянна.

Оптический эффект Доплера



источник в (K'):

$$\nu_0 = \frac{1}{T_0}$$

в (K): $T = \frac{T_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

$$\lambda = cT - vT = T(c-v) = T_0 \frac{(c-v)}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \nu_0 \frac{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\cdot c}{c-v} = \nu_0 \sqrt{\frac{1+v/c}{1-\frac{v}{c}}} \quad (4)$$

Продольный эффект Доплера:

1) если в (4) $\frac{v}{c} << 1 \xrightarrow{\text{то}} (1)$

2) сближение: $v>0$; $\nu > \nu_0$; $\lambda < \lambda_0$ (синее смещение)

3) удаление: $v<0$; $\nu < \nu_0$, $\lambda > \lambda_0$ (красное смещение).

поперечный эффект Доплера:

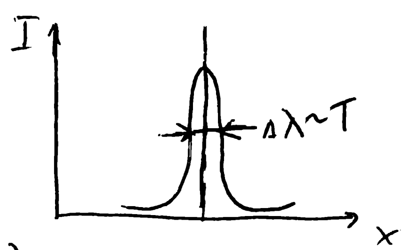
$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \quad \nu = \nu_0 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \quad (5)$$

а) диагностика плазмы

$D^+ + D^+ \to He_2^4 + 27$ МэВ (термоядерная реакция)

$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$ $\quad r > 10^{-13}$ см – отталкивание

$r < 10^{-13}$ см – притяжение.



$E \sim kT$

$v \sim \sqrt{kT}$

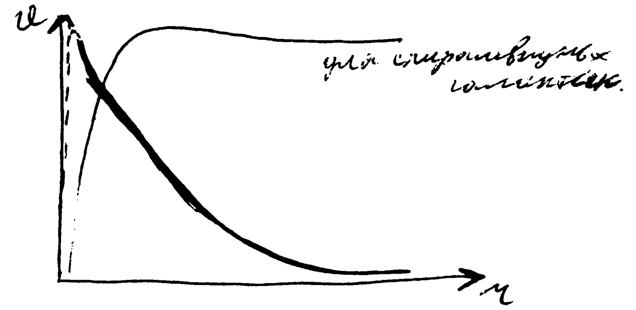
б) открытие Хаббла

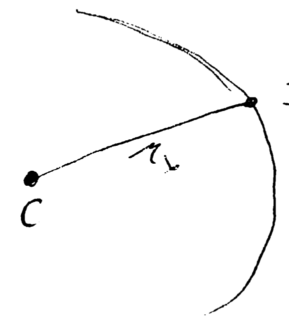
наблюдается красное смещение ($\lambda > \lambda_0$)

↓

$v = RH$, $\tau = \frac{1}{H}$ (H-пост-я Хаббла) в) ротационные скорости галактики.

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

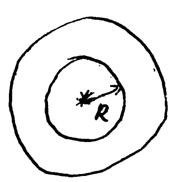




$$\frac{m v^2}{r} = \frac{G M m}{r^2}$$

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

§7. Интервал (пространственно-временной интервал)



$$R = ct$$

в (K): $r^2 = c^2t^2$	
$x^2+y^2+z^2 = c^2t^2$	$c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0$
в (K'): $r'^2 = c^2t'^2$	
$x'^2+y'^2+z'^2 = c^2t'^2$	$c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = 0$

$$\longrightarrow c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = c^2\Delta t'^2 - \Delta x'^2 - \Delta y'^2 - \Delta z'^2$$

$$\Delta S^2 = \Delta S'^2$$

ΔS – пространственно-временной интервал.

$c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = ?$, где $t' = \frac{t - v x \frac{1}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$; $y' = y$,

подставим преобразования Лоренца

$z' = z$,

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = \Delta S^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta l^2$$

Соотношение между координатной и временной частями интервала	Тип интервала	Характер причинно-следственной связи между событиями.
$\Delta l^2 = c^2 \Delta t^2$ $\Delta S^2 = 0$	светоподобный интервал (нулевой).	может быть связь через световые сигналы.
$\Delta l^2 > c^2 \Delta t^2$ $\Delta S^2 < 0$	пространственно-подобный.	нет причинно-следственной связи.
$\Delta l^2 < c^2 \Delta t^2$ $\Delta S^2 > 0$	времениподобный.	может быть.

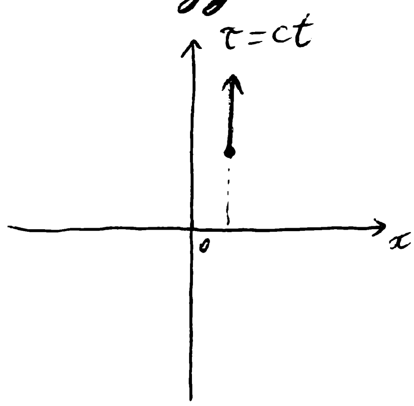
09.11.10г.

$$\Delta S^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2$$

$$\Delta S^2 = \Delta S'^2$$

В 1908 году польский физик Минковский предложил:

$x, y, z, ct.$

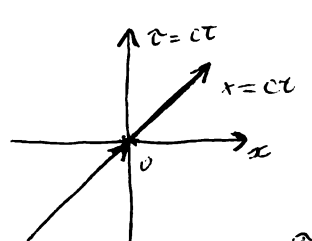


— мировая точка (соответствующая какому-либо событию).

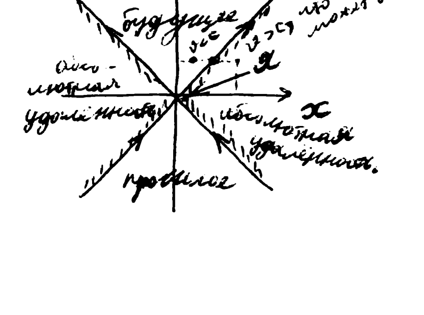
— мировая линия (последовательность событий, которая происходит с объектом).

$x = ct$

$-x = -ct$

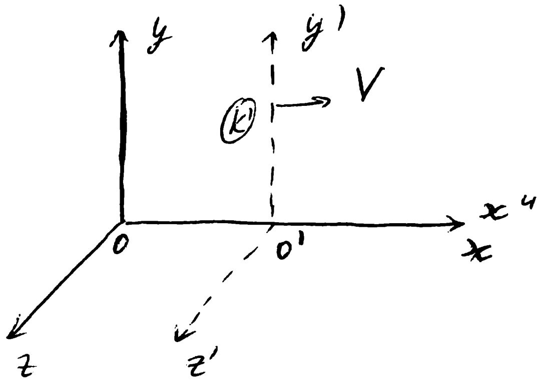


— мировая линия света.



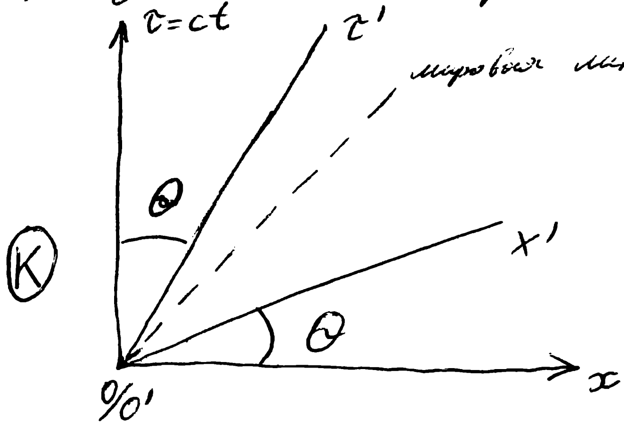
получился световой конус.

§8. Диаграмма Минковского.



– В пространстве Минковского соблюдается псевдо-евклидова геометрия.

а) Взаимная ориентация осей:



в (K) оси: $O\tau$ – мировая линия событий при $x=0$.

Ox – мировая линия событий, которые происходят при $\tau=0$, одновременных с событием в точке O.

в (K') оси: $O\tau' = ct'$ – мировая линия событий, которые происходят при $x'=0$; $x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} = 0$

$$Vt = x,\ t = \frac{x}{V};$$

$$x = \cancel{Vt} = \frac{V}{c}\tau$$

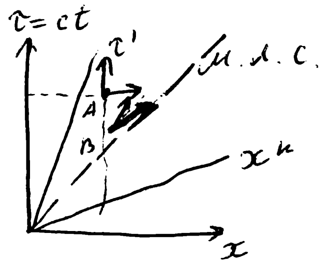
$$tg\,\theta = \frac{V}{c}$$

$O'X'$ – м.л.с., которая происходят одновременно с событием в точке O' $\tau' = 0$

$$t' = \frac{t - \frac{V}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} = 0$$

$$ct = \frac{V}{c}x$$

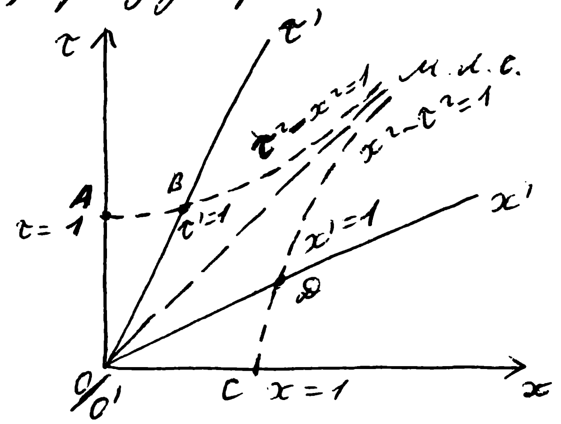
$$tg\,\theta = \frac{V}{c}$$



в (K) возьмём точку A; $x_A = const$, τ_A

в (K') возьмём точку B; $x'_B = const$, τ'_B

б) Градуировка осей:



$$\Delta S^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$$

отсчёт от точки: $x=0$; $t=0$:

$$c^2t^2 - x^2 = S^2$$

$\tau^2 - x^2 = 1 = \tau'^2 - x'^2$

- гипербола

$\tau=1$ при $x=0$, $A(0;1)/A(x;\tau)$

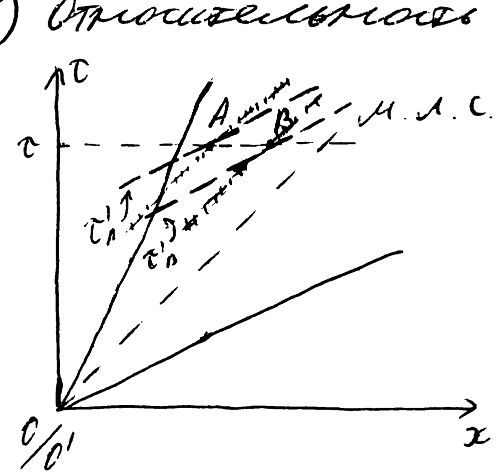
$\tau'=1$, $x'=0$; $B(x';\tau')$

$x^2-\tau^2=1=x'^2-\tau'^2$

$\tau=0$ при $x=1$, $C(1;0)$; $C(x;\tau)$

$\tau'=0$ при $x'=1$, $D(x';\tau')$

в) Относительность понятия одновременности:



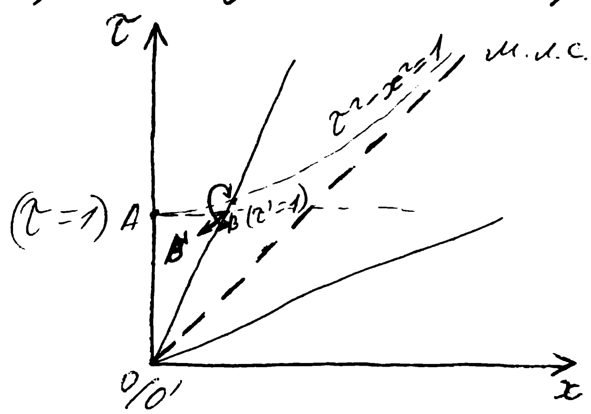
в (K): в точке A – x_A, B – x_B | $\tau_A=\tau_B$

$\Delta\tau = \tau_A - \tau_B = 0$

в (K'): точка A – x'_A, B – x'_B

$\Delta\tau' = \tau'_A - \tau'_B \neq 0$

г) Замедление времени:



в точках O и O' $\tau = \tau'$

точка A: $\tau = 1$, $x = 0$.

точка B: $x' = 0$; $\tau' = 1$.

$$\tau^2 - x^2 = 1 = \tau'^2 - x'^2$$

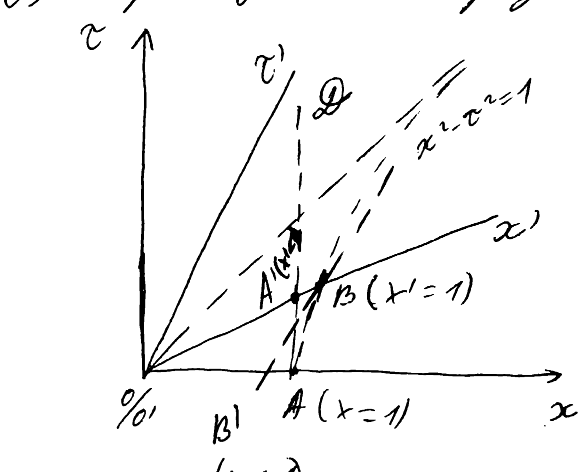
(К) AB' – ($\parallel OX$) – события, одновременные в точке A в (К)-системе.

B' ($\tau' < 1$), значит время в системе (К) идёт медленнее

(К') м.л. событий одновременных с точкой B. $\parallel O'X'$

точка A' ($\tau < 1$), значит в системе (К) время идёт медленнее.

д) Сокращение продольных масштабов:



$$x^2 - \tau^2 = 1 = x'^2 - \tau'^2$$

точка A ($x_A = 1$; $\tau = 0$)

точка B ($x'_B = 1$; $\tau' = 0$)

$\tau_0 = \tau_{0'} = 0$

Пусть в (К)-системе покоится стержень длиной 1 м.

$x = 0 \longrightarrow x_A = 1$ м

м.л. начала стержня – 0τ; м.л. конца стержня – AD

Измеряем из (К') (одновременная фиксация координат начала и конца стержня, одновременное).

одновременно с точкой 0 (ИОС') В В'

$X_{B'} < 1$

Чали стержень длиной 1 м покойтая в (К') системе: $x'=0$ ———— $x'=1$ B

из (К)-системы одновременно нужно засечь координаты начала и конца.

(ИОС) A' $(x' < 1)$

15.10.10 г. §9. Релятивистский импульс.

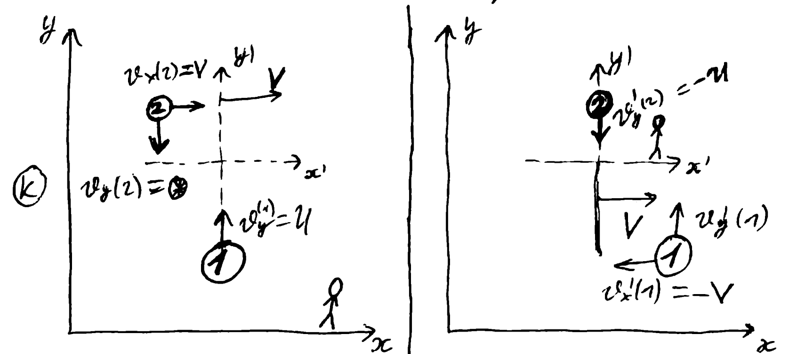
$$u_y' = \frac{u_y\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}{1-\frac{u_x V}{c^2}}$$

$$u_y = \frac{u_y'\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}{1+\frac{u_x V}{c^2}}$$

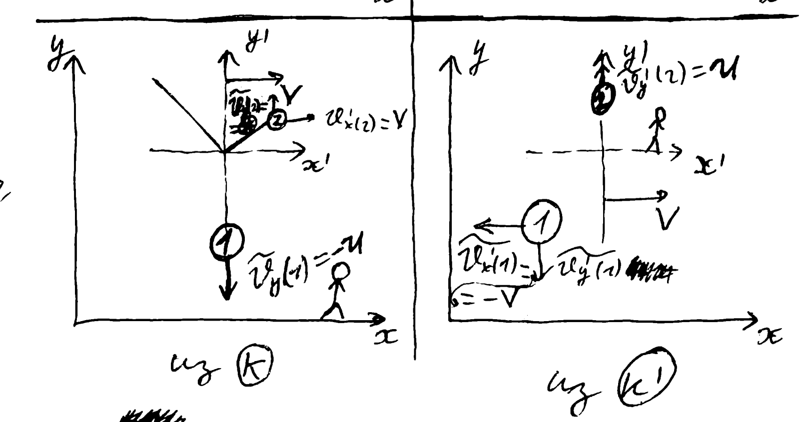
Ньют: $\vec{p} = m\vec{v}$, $m = const$. З.С.И: $\frac{d\vec{p}}{dt} = 0$

Рел. импульс: $\vec{p} = \underbrace{b(v)}_{\text{скаляр}} \cdot \vec{v}$! ЗСИ — есть. $\Delta P = 0$.

до



после



$$v_y(2) = \frac{v_y'(2)\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}{1+\underbrace{\frac{u_x(1)V}{c^2}}_{0}} = +u\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}} \circledast$$

$$\widetilde{v}_y(2) = \frac{\widetilde{v}_y'\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}{1+\underbrace{\frac{u_x V}{c^2}}_{0}} = u\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}} \#$$

в (K) $\Delta\vec{P}=0$ $\quad \Delta P_x = \Delta P_x(1) + \Delta P_x(2) = 0$

$\Delta P_y = \Delta P_y(1) + \Delta P_y(2) = 0$

до: $u(1) = |\vec{u}(1)| = \sqrt{\underbrace{u_x^2(1)}_{0} + \underbrace{u_y^2(1)}_{u}} = u$

$u(2) = |\vec{u}(2)| = \sqrt{u_x^2(2) + u_y^2(2)} = \sqrt{V^2 + u^2\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)}$

после: $\tilde{u}(1) = |\tilde{\vec{u}}(1)| = u$

$\tilde{u}(2) = \sqrt{\tilde{u}_x^2(2) + \tilde{u}_y^2(2)} = \sqrt{V^2 + u^2\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)}$

$\vec{P}(1) = b(u(1))\,\vec{u}(1)$

$\vec{P}(2) = b(u(2))\cdot\vec{u}(2)$

З.С.И: $\underbrace{\Delta P_x(1)}_{0} + \underbrace{\Delta P_x(2)}_{0} = 0 \quad ; \Delta P_x = 0$

$\cancel{\Delta P_y(1) = 2u\,b(u) = \Delta P_y}$

$\cancel{\Delta P_y(2) = b\left(\sqrt{V^2 + u^2\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)}\right)}$

$\Delta P_y(1) = -\Delta P_y(2)$

$2u\,b(u) = 2u\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}\cdot b\left(\sqrt{V^2+u^2\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)}\right) \Big/ : 2u$

$b(u) = \sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}\cdot b\left(\sqrt{V^2+u^2\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)}\right)$ (1)

– это соотношение явл. ур-ем для определения функциональной зависимости b от своего аргумента, оно должно выполняться при любых u,

при $u \to 0$: $b(0) = b(V)\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}$

$b(V) = \frac{b(0)}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$; $V \ll c$.

$b(0) = m$.

$b(u) = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$

$$\boxed{\vec{P} = b(u)\cdot\vec{u} = \frac{m\vec{u}}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}}$$ (2)

$$\vec p = \frac{m\vec v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$ — релятивистский импульс.

§10. Основное уравнение релятивистской динамики.

Ньют:

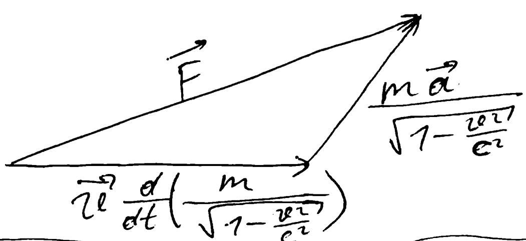
З. С. И. : $\frac{d\vec p}{dt} = 0$

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

Эйнштейн: $\frac{d\vec p}{dt} = 0$; $\boxed{\frac{d\vec p}{dt} = \vec F}$ (1)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{m\vec v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right) = \vec F$$

$$\frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\frac{d\vec v}{dt} + \vec v\,\frac{d}{dt}\frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \vec F \quad (2)$$



1) $\vec F \parallel \vec v$; $\vec F = q\vec E \Longrightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{mv}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right) = F$

$$F = \frac{m\frac{dv}{dt}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} + \frac{v\cdot m\frac{v}{c^2}\frac{dv}{dt}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} =$$

$$\boxed{\frac{d}{dt}\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = -\frac{1}{2}\,\frac{-\frac{1}{c^2}2v\frac{dv}{dt}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}} = \boxed{\frac{\frac{v}{c^2}\frac{dv}{dt}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}}$$

$$\boxed{\frac{d}{dt}f^n = nf^{n-1}\frac{df}{dt}}$$

$$= \frac{\cancel{m\frac{v^2}{c^2}\frac{dv}{dt}} + m\frac{dv}{dt} - \cancel{m\frac{v^2}{c^2}\frac{dv}{dt}}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$F = \frac{m}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}\cdot\frac{dv}{dt} \quad (3)$$

$\xrightarrow{\vec v}$

$\xrightarrow[\vec F]{}$ изменяется только $v = |\vec v|$

⚠ если $\vec p = m_r\vec v$; $m_r = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ (3')

$$F = m_{прод}\cdot\frac{dv}{dt}$$

„$m_{прод}$" $= \frac{m}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$ — это не правильно!

16.11.10 г.

$\vec F \perp \vec v$

$\vec F = \frac{q}{c}[\vec v \times \vec B]$ $\qquad$ $\vec F = q\vec E + \underbrace{\frac{q}{c}[\vec v \times \vec B]}_{\perp \vec v}$

$$\frac{d\vec p}{dt} = \frac{q}{c}[\vec v \times \vec B] \quad \Big|\cdot \vec p$$

$$\vec p \cdot \frac{d\vec p}{dt} = \frac{q}{c}\left(\vec p \cdot [\vec v \times \vec B]\right) \qquad \vec p \cdot \vec p = p^2 = p\,p$$

$$\frac{1}{2}\frac{dp^2}{dt} = 0 \qquad \vec v \cdot \vec v = v^2 = v\,v$$

$$p = const = \frac{mv}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow v = const.$$

$$\frac{m\vec a}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} + \underbrace{\vec v \frac{d}{dt}\left(\frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)}_{=0} = \vec F$$

$$\frac{m\vec a}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \vec F$$

$$F = \frac{ma}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac12}} \qquad (4)$$

$$\text{„прод. } m\text{"} = \frac{m}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}}$$

$$\text{„попер. } m\text{"} = \frac{m}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac12}}$$

$$\text{„прод } m\text{"} > \text{„попер. } m\text{"}$$

Физически это означает, что проще изменить направление ч. частицы ~~[illegible]~~, чем её модуль.

§11. Энергия в релятивистской механике.

$E = mc^2$; где m — масса покоя.

$$\frac{d\vec p}{dt} = \vec F \quad \Big|\cdot d\vec r$$

$$d\vec r \cdot \frac{d\vec p}{dt} = (\vec F\, d\vec r)$$

$$(\vec F \cdot d\vec r) = dA = dK$$

$$d\vec r = \vec v\, dt$$

$$\vec v\, dt\, \frac{d\vec p}{dt} = dK$$

$$\frac{dk}{dt} = \vec{v}\,\frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$\vec{v}\,\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{v}\cdot\frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\cdot\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v}\cdot m\vec{v}\,\frac{d}{dt}\cdot\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{dk}{dt} =$$

$$= \frac{m v\frac{dv}{dt}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{m v^2\cdot v\frac{1}{c^2}\cdot\frac{dv}{dt}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$= \frac{\frac{m v^3}{c^2}\frac{dv}{dt} + m v\frac{dv}{dt} - \frac{m v^3}{c^2}\frac{dv}{dt}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\frac{dk}{dt} = \frac{m v\frac{dv}{dt}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\frac{dk}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)$$

$$\frac{d}{dt}\,\frac{m c^2}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{m c^2\frac{v}{c^2}\frac{dv}{dt}}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} + D$$

D – константа интегрирования

$v \to 0,\ k \to 0$

$$0 = \frac{mc^2}{1} + D$$

$$D = -mc^2$$

$$k = \underbrace{\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}}_{E} - mc^2$$

полная энергия рел-ой частицы

$$\boxed{E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}} \quad (1)$$

$$\boxed{E = k + mc^2} \quad (2)$$

$$E^2 = \frac{m^2c^4}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$(c\vec{p})^2 = c^2p^2 = \frac{m^2c^2v^2}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$E^2 - c^2p^2 = \frac{m^2c^4 - m^2c^2v^2}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{m^2c^6 - m^2c^4v^2}{c^2-v^2} = \frac{m^2c^2(c^2-v^2)}{c^2-v^2}$$

$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m^2c^2$$

$$\boxed{\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m^2c^2} \quad (3)$$

– релятивистский инвариант.

$$E^2 = K^2 + 2Kmc^2 + m^2c^4$$

$$E^2 - m^2c^4 = K(K + 2mc^2)$$

$$E^2 - m^2c^4 = c^2p^2$$

$$\boxed{cp = \sqrt{K(K+2mc^2)}} \quad (4)$$

1) если $m \neq 0$; $v = c$.

$E \to \infty$; $p \to \infty$, что быть не может.

2) из ф-лы (4) следует:

релятив. случай: $K \gg mc^2$; $p = \frac{K}{c}$ – (кин. эн. гораздо больше энергии покоя).

$p = \frac{K}{c}$; у фотона: $K = \hbar\omega$

$p = \hbar \frac{\omega}{c}$

$\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} = k$ - волновое число.

$p = \hbar \cdot k$; $k \neq K$

нерелятив.: $K \ll mc^2$,

из (4) $\Rightarrow p = \sqrt{2Km}$

$\frac{p^2}{2m} = mv^2 = K$

$E = mc^2$, где m – масса покоя.

Любое изменение будет неизбежно вести к изменению массы $\Rightarrow$ будет выделяться энергия.

$\Delta E_{внутр} \to \Delta m$

3) Ньютона: $\vec{p} = m\vec{v}$ $\quad \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$

const.

Релятив.: $\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

$$\frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{E}{c^2}$$

$$E^2 = \frac{m^2c^4}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

$$p = \underbrace{\left(\frac{E}{c^2}\right)}_{\text{мера инертности}}\vec{v}$$

§12. Энергия связи ядер.

$O_8^{16} = 8\cdot p + 8n$

$M < 8 m_p + 8 m_n$

$m_p = 938{,}2$ МэВ

$m_n = 939{,}5$ МэВ

22.11.10г.

Радиус ядер: $r \approx A^{\frac{1}{3}}$ ферми

$X_z^A \qquad A = z + N \qquad E = \dfrac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

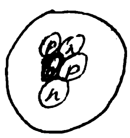
$E_x = \sum E_0 + U$; $U<0$! $\qquad E_0 = mc^2$.

$U<0$ — притяжение

$U>0$ — отталкивание.

$$\underbrace{E_x - \sum E_0}_{\Delta E\text{ — энергия связи.}} < 0$$

$$\frac{\Delta E}{A} = \varepsilon \left(\frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}}\right)$$

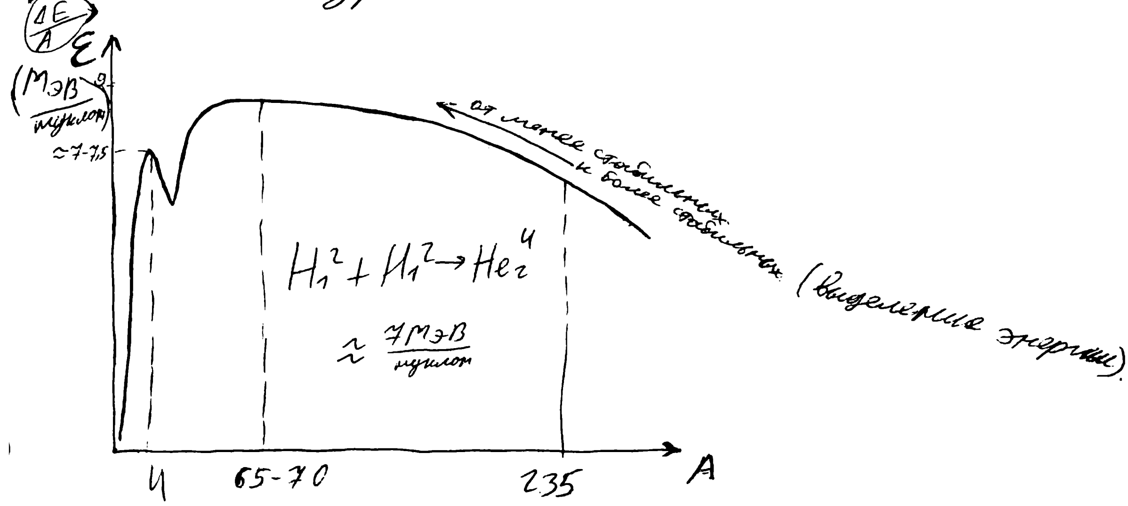


Сильное взаимодействие — притяжение.

Э/мВ — p-p - отталкивание
p-n, n-n } нейтральное.

Лёгкие ядра: $z = N$

Тяжёлые ядра: $N > Z$



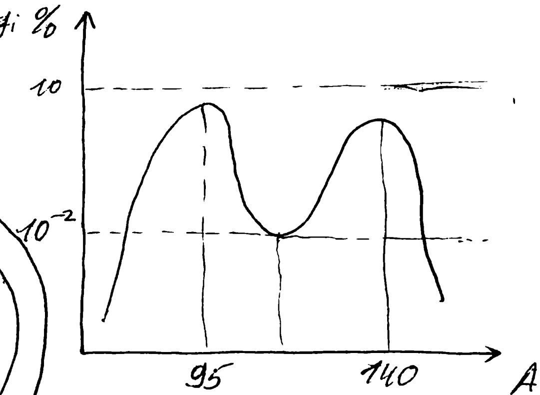
$^{235}_{92}U + ^1_0n \rightarrow ^{144}_{56}Ba + ^{89}_{36}Kr + 3\,^1_0n$

$^{235}_{92}U + ^1_0n \rightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{94}_{38}Sr + 2\,^1_0n$

U^{235}

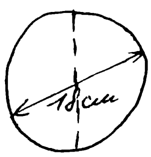
Pu^{239}

Взрывчатка (строение):



$\Delta E \approx 0{,}5 \frac{МэВ}{нукл.}$

U^{235} $m_{кр} = 50кг$ ($m_{кр}$ – критическая масса)



(шар диаметром 18 см из ^{235}U имеет массу 50кг).

1) Li^6D (литий (6)-дейтерий) – вещество для бомбы ~~водородной бомбы~~.
(дейтерид лития)

$Li^6D + n \longrightarrow He^4_2 + H^3_1 + Q$

Li^6D – в твёрдом виде.

2) Сахаровская „слойка":
(термоядерная ~~реакция~~ бомба)

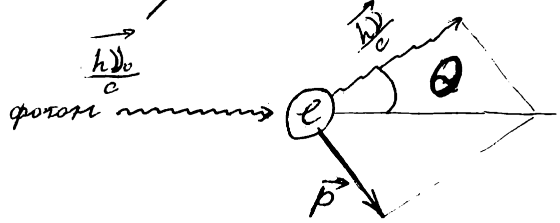
U	(уран)
LiD	(дейтерид лития)
U	(уран)
LiD	(дейтерид лития)

Термоядерные реакции в звёздах.

$2e + 4p \longrightarrow He^4 + 2\nu_e + 26{,}73$ МэВ

§13. Эффект Комптона.

— упругое рассеяние фотонов на свободных электронах.



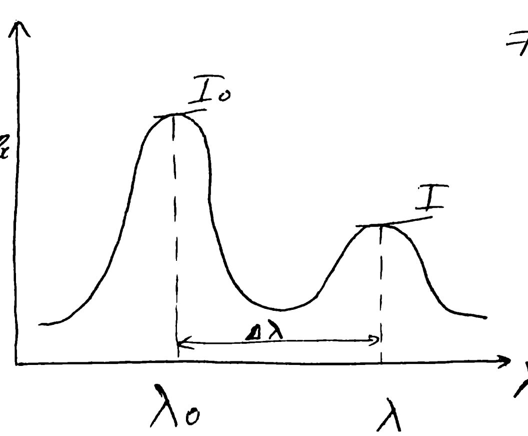
до $\begin{cases} \text{фотон: } \varepsilon = h\nu_0; \; p = \frac{h\nu_0}{c} = \frac{\hbar\omega_0}{c} \\ \text{свободные электроны: } E = mc^2 \end{cases}$

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda_0} = h\nu_0$$

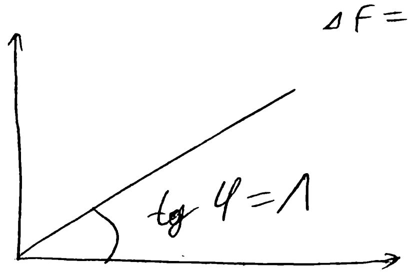
после $\begin{cases} \text{фотон: } \varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega, \; p = \frac{h\nu}{c} \\ \text{электрон отдачи: } E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \\ \vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}. \end{cases}$

$\lambda > \lambda_0$; $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \Lambda(1-\cos\Theta) = \Lambda 2\sin^2\frac{\Theta}{2}$

I/I_0 — зависит от вещ-ва

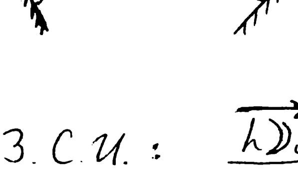


$\Delta F = f(\Theta)$



! $\Delta\lambda$ — не зависит от вещества.

$\varepsilon = h\nu$



1 З.С.И.: $\frac{\overrightarrow{h\nu_0}}{c} = \frac{h\nu}{c} + \vec{p}$; $\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.

2 З.С.Э.: $h\nu_0 + mc^2 = h\nu + E$; $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.

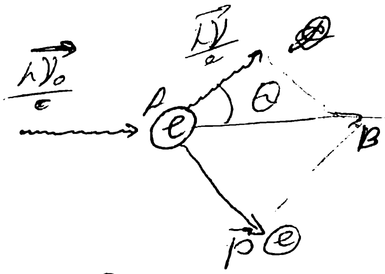
23.11.10г.

(1') $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$ — релятивистский инвариант.

$\vec{p} = \frac{\hbar\vec{\omega}}{c} = \frac{h\vec{\nu}}{c} = \frac{\vec{h}}{\lambda}$

$\vec{p} = h\vec{k}$; $\vec{k}$ — волновой эффект.

$\vec{k} = \frac{\omega}{c}\vec{n}$



З.С.И: $\frac{\overrightarrow{h\nu_0}}{c} = \frac{h\vec{\nu}}{c} + \vec{p}$ (1)

З.С.Э.: $h\nu_0 + mc^2 = E + h\nu$ (2)

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

ΔABD: $BD^2 = AD^2 + AB^2 - 2AD\,AB\cos\theta$

$p^2 = \frac{h^2\nu^2}{c^2} + \frac{h^2\nu_0^2}{c^2} - 2h^2\left(\frac{\nu\nu_0}{c^2}\right)\cos\theta$

$p^2c^2 = h^2\nu^2 + h^2\nu^2 - 2h^2\,\nu\nu_0\cos\theta$ (3)

$E = h(\nu_0 - \nu) + mc^2$

$E^2 = h^2(\nu_0 - \nu)^2 + 2hmc^2(\nu_0 - \nu) + m^2c^4$

(4) $E^2 - m^2c^4 = h^2\nu_0^2 + h^2\nu^2 - 2h^2\nu_0\nu + 2hmc^2(\nu_0 - \nu)$

(3) = (4) в силу (1').

$h\nu\nu_0(1-\cos\theta) = mc^2(\nu_0 - \nu)$

$\frac{h}{mc}(1-\cos\theta) = \frac{c}{\nu} - \frac{c}{\nu_0} = \lambda - \lambda_0$

(5) $\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1-\cos\theta) = \frac{h}{mc}2\sin^2\frac{\theta}{2}$

$\frac{h}{mc} = \Lambda = 0{,}0242$ Å — теор.

Å $= 10^{-8}$ см.

(комптоновская длина волны).

$\Lambda = (0{,}02424 \pm 0{,}00004)$ A^0 — эксп.

Обратный эффект Комптона.

$E = 900$ МэВ

$\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} = 30$ МэВ.