***Был этот мир глубокой тьмой окутан.***
***Да будет свет! И вот явился Ньютон,***
***Но Сатана недолго ждал реванша,***
***Пришел Эйнштейн, –***
***и стало все как раньше.***

***С.Я. Маршак***

***Здоровий глузд – це забобони, які формуються у віці до вісімнадцяти років***

***А. Ейнштейн***

# РЕЛЯТИВІСТСЬКА МЕХАНІКА

Класична механіка (механіка Галілея - Ньютона) описує рух макроскопічних тіл зі швидкостями набагато меншими за швидкість світла

$$V \ll c$$

## Основні уявлення класичної фізики

1. Простір є трьохвимірним і евклідовим.
2. Час не залежить від простору.
3. Принцип відносності Галілея є однією з цеглинок фундаменту класичної фізики.
4. Виконується **принцип відносності Галілея.**
5. Виконується **принцип дальнодії**: взаємодія поширюється миттєво, тобто з нескінченною швидкістю.

При подальшому розвитку фізики виникло питання чи поширюється принцип відносності Галілея на немеханічні явища? Якщо ні, то за допомогою цих немеханічних явищ можна розрізняти інерціальну і неінерціальну системи відліку.

# Зміст

- **Постулати спеціальної теорії відносності.**
- **Перетворення Лоренца.**
- **Перетворення та складання релятивістських швидкостей.**
- **Відносність просторових інтервалів.**
- **Відносність часових інтервалів.**
- **Інтервал в чотирьохвимірному просторі.**
- **Релятивістський імпульс та релятивістська маса.**
- **Кінетична та повна релятивістська енергія.**
- **Релятивістський інваріант "енергія-імпульс".**

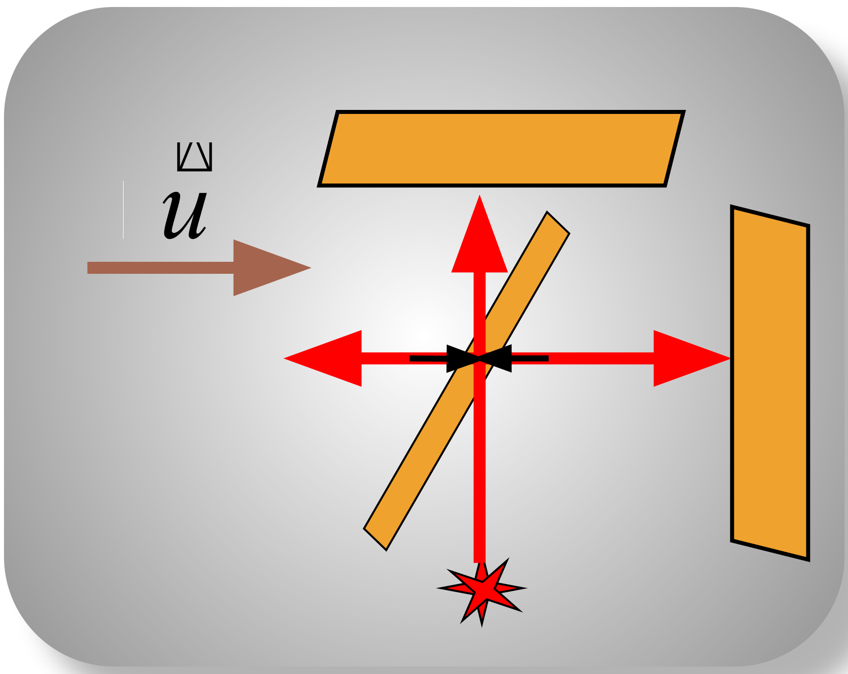
# Постулати спеціальної теорії відносності

- ***Перший постулат СТВ (принцип відносності Ейнштейна):*** **усі закони природи однакові у всіх інерціальних системах відліку. Цей постулат є поширенням принципу відносності Галілея на усі фізичні явища.**

- ***Другий постулат СТВ (принцип сталості швидкості світла): швидкість світла у вакуумі однакова у всіх інерціальних системах відліку і не залежить від швидкостей руху як джерел, так і приймачів світла. Швидкість світла у вакуумі є однією із найважливіших фізичних констант, це гранична швидкість у природі.***

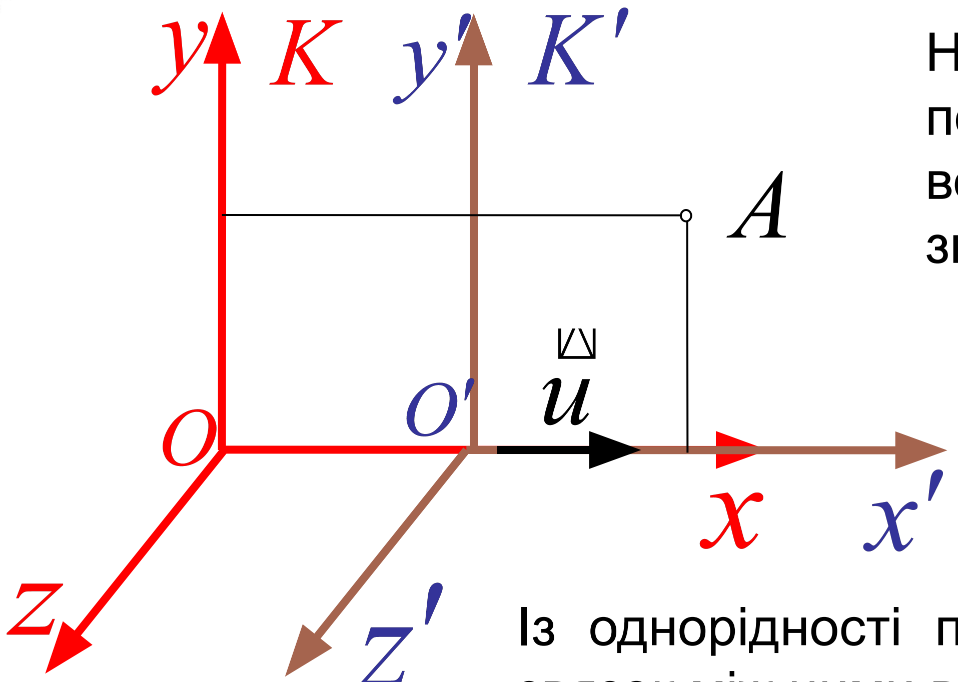
# Досліди Майкельсона і Морлі

За допомогою інтерферометра Майкельсона вчені вимірювали швидкість світла у двох перпендикулярних напрямках. При цьому обертання Землі мало привести до того, що світло мало проходити однакові відстані за різні проміжки часу. Але такої різниці часу не було виявлено.




Ці досліди багатократно повторювалися. З'ясувалося, що всупереч існуючим на той час уявленням **швидкість світла однакова у всіх інерціальних системах відліку.**

# ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛОРЕНЦА




Нехай у т. *A* відбувається певна подія. В "нерухомій" системі вона характеризується значеннями координат і часу.

$$x, y, z, t$$

У системі $K'$

$$x', y', z', t'$$

Із однорідності простору і часу випливає, що звязок між цими величинами має бути лінійним

Це можливо за умови $y = \alpha y'$ та $y' = \alpha y$

Перемножимо ці вирази, та отримаємо $\alpha = \pm 1$

Це означає, що $y' = y$ та $y = y'$

Аналогічно $z' = z$ та $z = z'$

Координата точки *O* у системі $K$ $x = 0$

а у системі $K'$ $x' = -ut$

Ці два вирази мають обертатися в нуль одночасно, тобто

$$x = \gamma\left(x' + ut'\right) \qquad x' = \gamma\left(x - ut\right)$$

Припустимо, що вздовж осі *x* посилається світловий сигнал, спалах від якого реєструється в кожній системі, при цьому оскільки швидкість світла в обох системах однакова.

$$x = ct \qquad x' = ct'$$

Виконаємо низку перетворень, та отримаємо

$$\beta = {}^{u}\!/_{c}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - {}^{u^2}\!/_{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

# ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛОРЕНЦА

$$x=\frac{x'+ut'}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad y=y' \quad z=z' \quad t=\frac{t'+\left(u/c^2\right)x'}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$x'=\frac{x-ut}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad y'=y \quad z'=z \quad t'=\frac{t-\left(u/c^2\right)x}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

При швидкостях, набагато менших за швидкість світла, перетворення Лоренца не відрізняються від перетворень Галілея.

# ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛОРЕНЦА

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

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

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

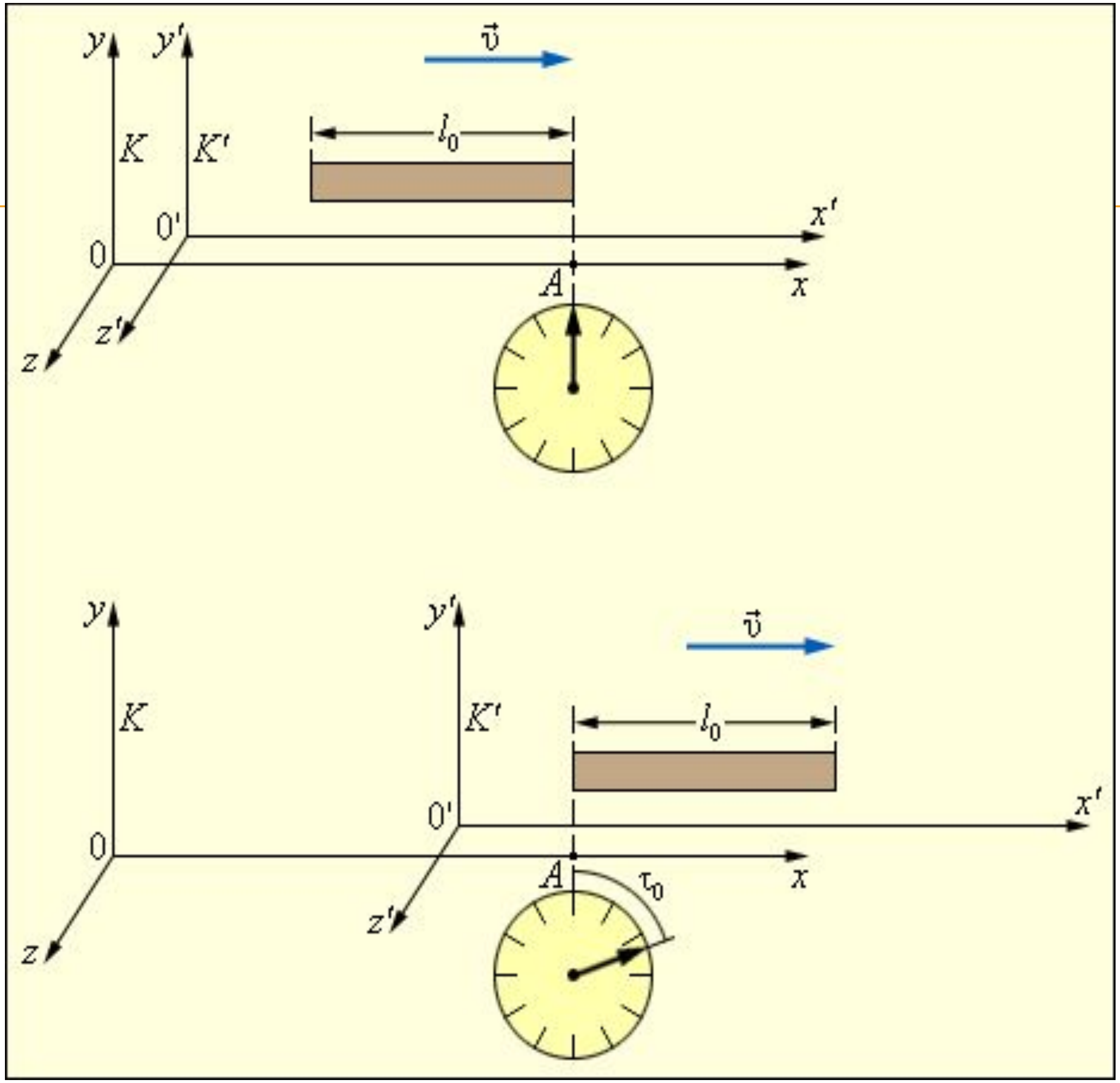
$$t' = \frac{t - \upsilon / c^2 \, x}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

# Перетворення та складання релятивістських швидкостей

$$\begin{cases} dx' = \dfrac{dx - \upsilon dt}{\sqrt{1-\beta^2}} \\ dy' = dy \\ dz' = dz \\ dt' = \dfrac{dt - \upsilon/c^2 dx}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{cases}$$

$$u' = \frac{u-\upsilon}{1-\dfrac{u\upsilon}{c^2}}$$

# Відносність просторових інтервалів



# ВІДНОСНІСТЬ ПРОСТОРОВИХ ІНТЕРВАЛІВ

$$l = x_2 - x_1$$

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

$$l_0 = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

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

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

# Відносність часових інтервалів

$$t'_2 = \frac{t_2 - \upsilon/c^2 x_2}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad t'_1 = \frac{t_1 - \upsilon/c^2 x_1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\tau_0 = t'_2 - t'_1 = \frac{(t_2 - t_1) - \upsilon/c^2 (x_2 - x_1)}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\tau_0 = \frac{\tau - \upsilon / c^2 (x_2 - x_1)}{\sqrt{1-\beta^2}}, \qquad x_2 - x_1 = \upsilon\tau$$

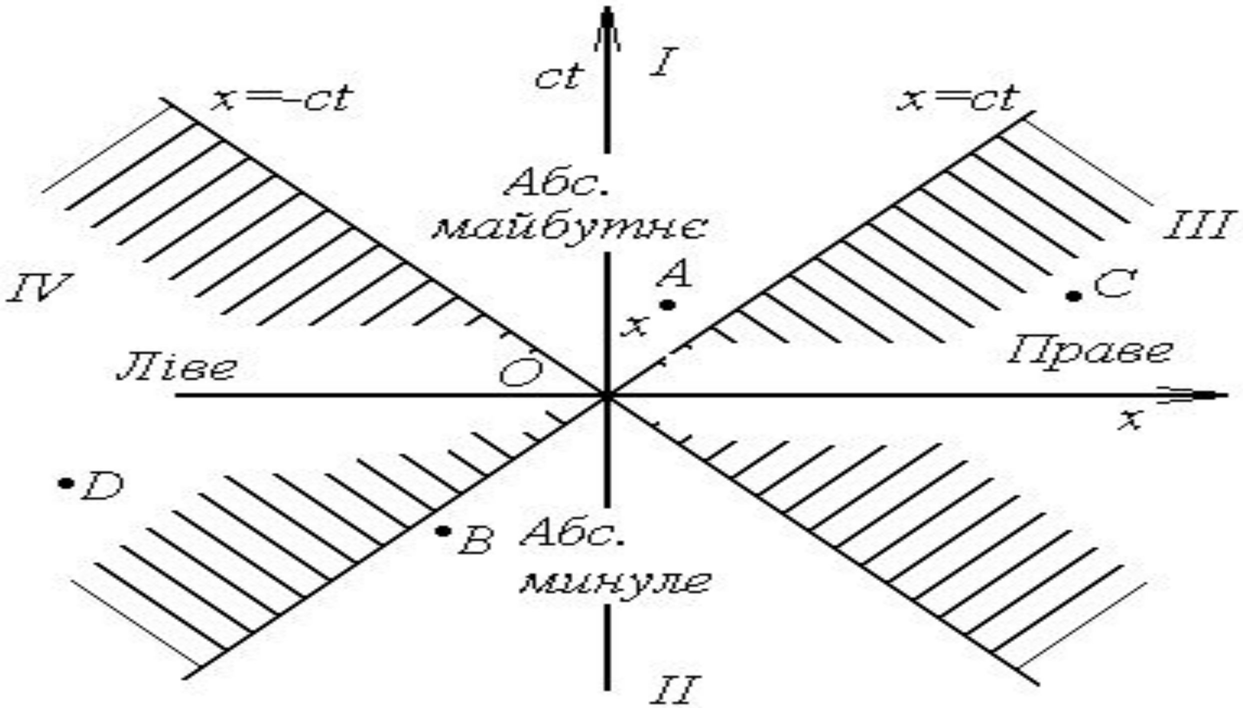
$$\tau_0 = \frac{\tau - \upsilon / c^2 \, \upsilon\tau}{\sqrt{1-\upsilon^2 / c^2}} = \frac{\tau\left(1-\upsilon^2 / c^2\right)}{\sqrt{1-\upsilon^2 / c^2}} = \tau\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}$$

# ВІДНОСНІСТЬ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ

$$\tau_0 = \tau\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}$$

Отже, тривалість подій, що відбуваються в деякій точці, найменша в тій інерціальній системі відліку, відносно якої ця точка нерухома **$\tau > \tau_0$**.

# Одночасність подій




$$t'_B - t'_A = \frac{\upsilon/c^2\left(x_A - x_B\right)}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}$$

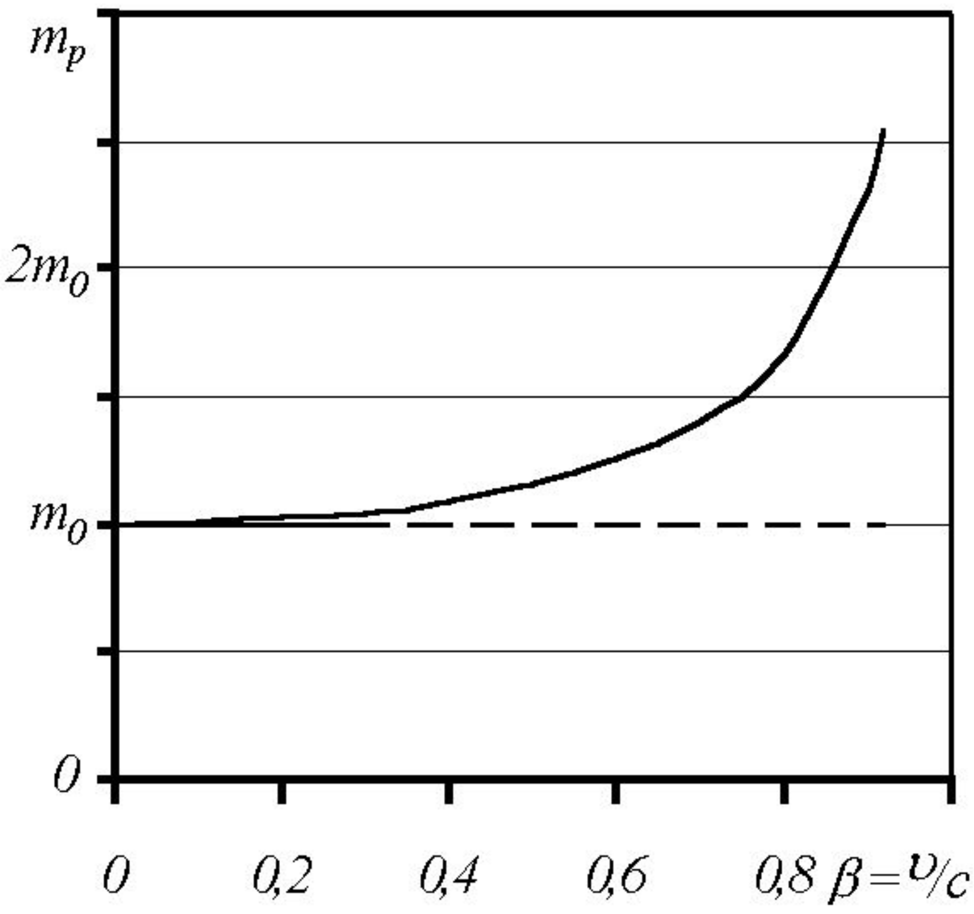
# Інтервал в чотирьохвимірному просторі

- Явище, що характеризується трьома координатами називається **подією.**
- Відстань між двома подіями називається **інтервалом S.**

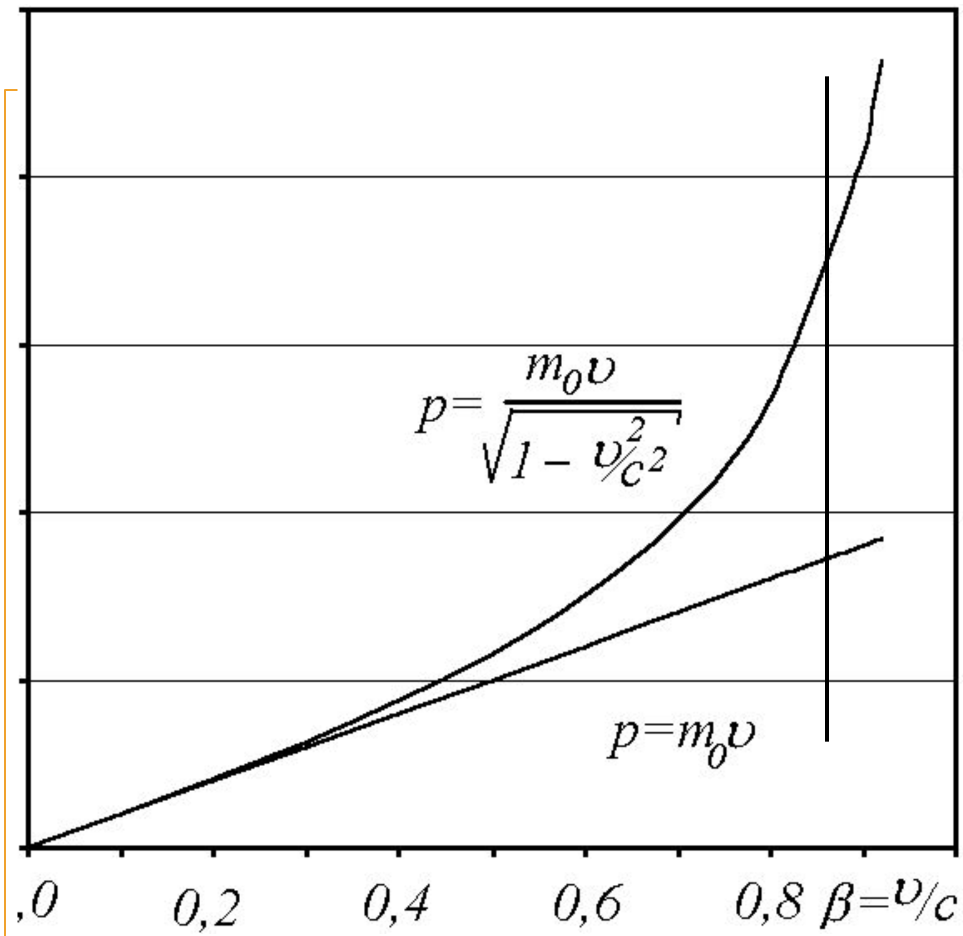
$$dS^2=c^2dt^2-dx^2-dy^2-dz^2$$
$$dS'^2=c^2dt'^2-dx'^2-dy'^2-dz'^2$$
$$dS = dS'$$

Просторово-часовий інтервал інваріантний відносно перетворень Лоренца.

Простір і час утворюють єдину форму існування матерії.




$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \upsilon^2/c^2}},$$




$$\vec{P}=m\vec{\upsilon}=\frac{m_0\vec{\upsilon}}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}$$

$$dT = \vec{F}\vec{\upsilon}dt = \vec{\upsilon}d\left(\frac{m_0\vec{\upsilon}}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}\right)$$

$$\vec{\upsilon}d\left(\frac{m_0\vec{\upsilon}}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}\right) = m_0\left[\frac{\upsilon d\upsilon}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}} + \frac{\upsilon^3 d\upsilon}{c^2\sqrt{\left(1-\upsilon^2/c^2\right)^3}}\right] =$$

$$= \frac{m_0 d\upsilon}{\left(1-\upsilon^2/c^2\right)^{3/2}}$$

$$dT = \frac{m_0 d\upsilon}{\left(1-\upsilon^2/c^2\right)^{3/2}},$$

$$T = m_0 \int \frac{d\upsilon}{\left(1-\upsilon^2/c^2\right)^{3/2}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}} + C$$

Постійна інтегрування $C$ визначається з умови:

при $\upsilon = 0,\ T = 0$ >>>> $C = -m_0 c^2$

$$T = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \upsilon^2 / c^2}} - 1 \right)$$

$$\left( 1 - \frac{\upsilon^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\upsilon^2}{c^2} + \frac{3}{8} \cdot \frac{\upsilon^4}{c^4} + \ldots$$

$$T = \frac{1}{2} m_0 \upsilon^2 + \frac{3}{8} \frac{m_0 \upsilon^4}{c^2} + \ldots$$

$$T = \frac{m_0 \upsilon^2}{2}$$

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-(\upsilon/c)^2}}, \quad \vec{p} = \frac{m_0 \vec{\upsilon}}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}} = m\vec{\upsilon}$$

$$E^2 = m^2 c^4 = \frac{m_0^2 c^4}{1-\upsilon^2/c^2}$$

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 = \frac{m_0^2 c^2}{1-\upsilon^2/c^2}, \qquad p^2 = \frac{m_0^2 \upsilon^2}{1-\upsilon^2/c^2}$$

$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m_0^2 c^2$$

# ...ятивістський інваріант "енергія-

- Комбінація енергії та імпульсу однакова в усіх інерціальних системах відліку:

$$E^2 - p^2c^2 = E'^2 - p'^2c^2 = m_0^2c^4$$

$$m_0c^2 = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \frac{E^2}{c^2}}.$$

# ДИНАМІКА СПЕЦІАЛЬНОЇ

- **Релятивістський імпульс** $\vec{p} = m\vec{v} = m_0 \dfrac{\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}$
- *ЕНЕРГІЯ РЕЛЯТИВІСТСЬКОЇ ЧАСТИНКИ*
-
- **Кінетична енергія** $T = \dfrac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0c^2 = m_0c^2\left(\dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right)$
- **Повна енергія** $E = \dfrac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ $E = E_0 + T$ $E = mc^2$
- **Енергія спокою** $E_0 = m_0c^2$
- **Зв'язок повної енергії з імпульсом** $E = c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$

**Релятивістська маса частинки** $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$