Szczególna teoria względności
A. Einsteina

Droga historyczna

- -200 lat triumfu mechaniki

  (*od sformułowania przez Newtona równań ruchu w 1666*)

- -J.C.Maxwell (1864) przedstawia równania elektromagnetyczne, które okazują się **niesymetryczne** względem transformacji Galileusza

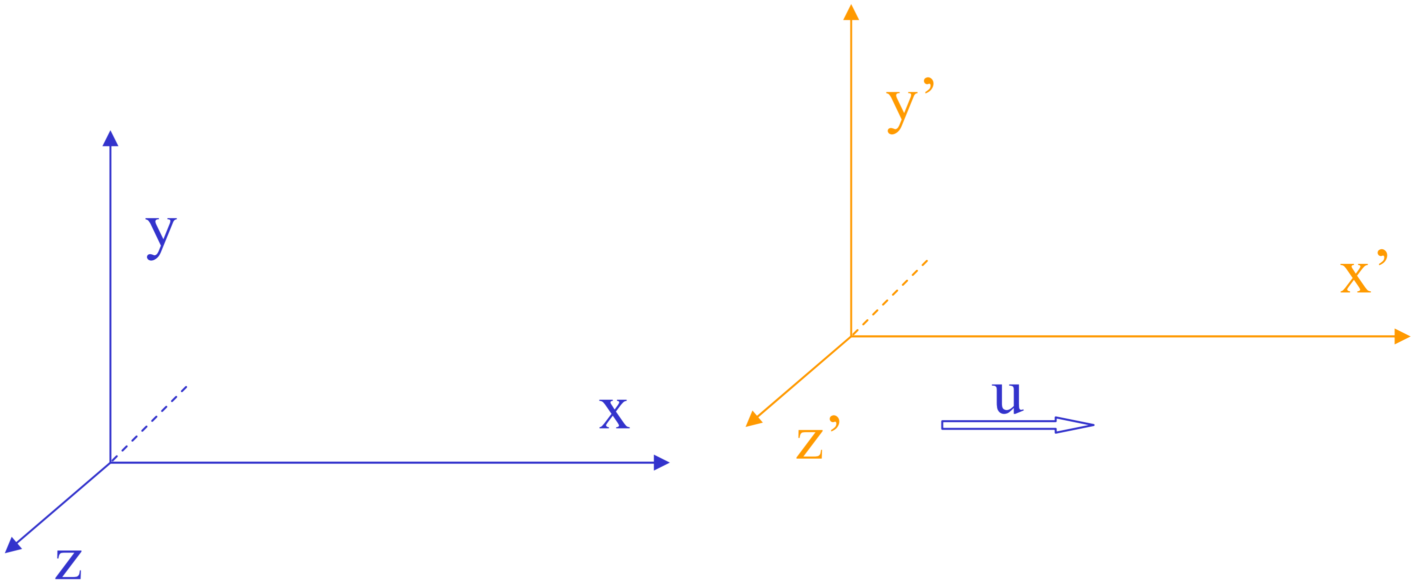
- -Próby „poprawienia" równań Maxwella $\Rightarrow$ niepowodzenie

- -H.A. Lorentz *metodą prób* znajduje podstawienie (nową transformację) dające niezmienniczość równań Maxwella

<u>Transformacja Lorentza (TL) dla układów **inercjalnych**</u> :

Oxyz $\longrightarrow$ Ox'y'z'

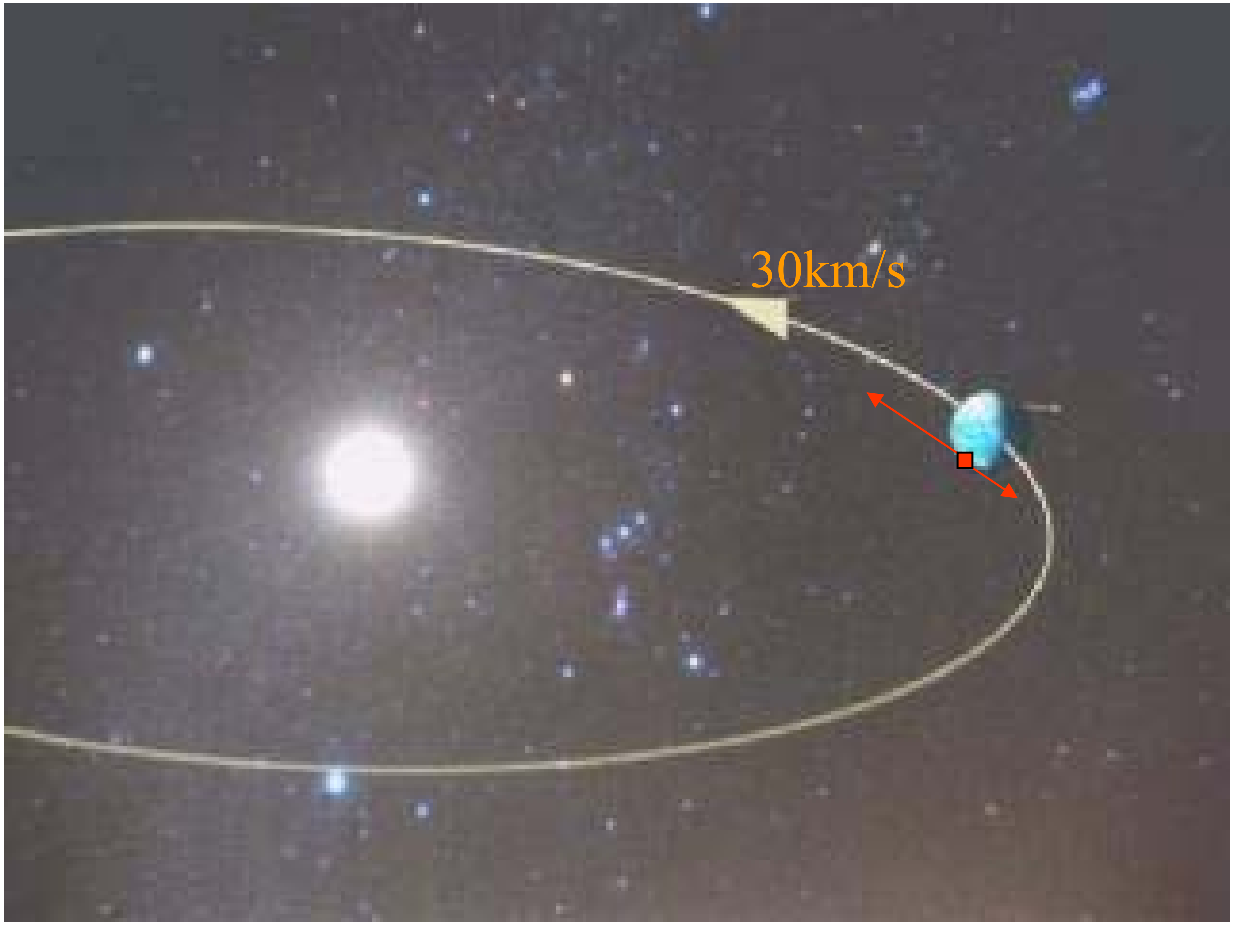
(*układ Ox'y'z' porusza się ze stałą prędkością* **u** = u$\mathbf{e_x}$ *względem Oxyz*)



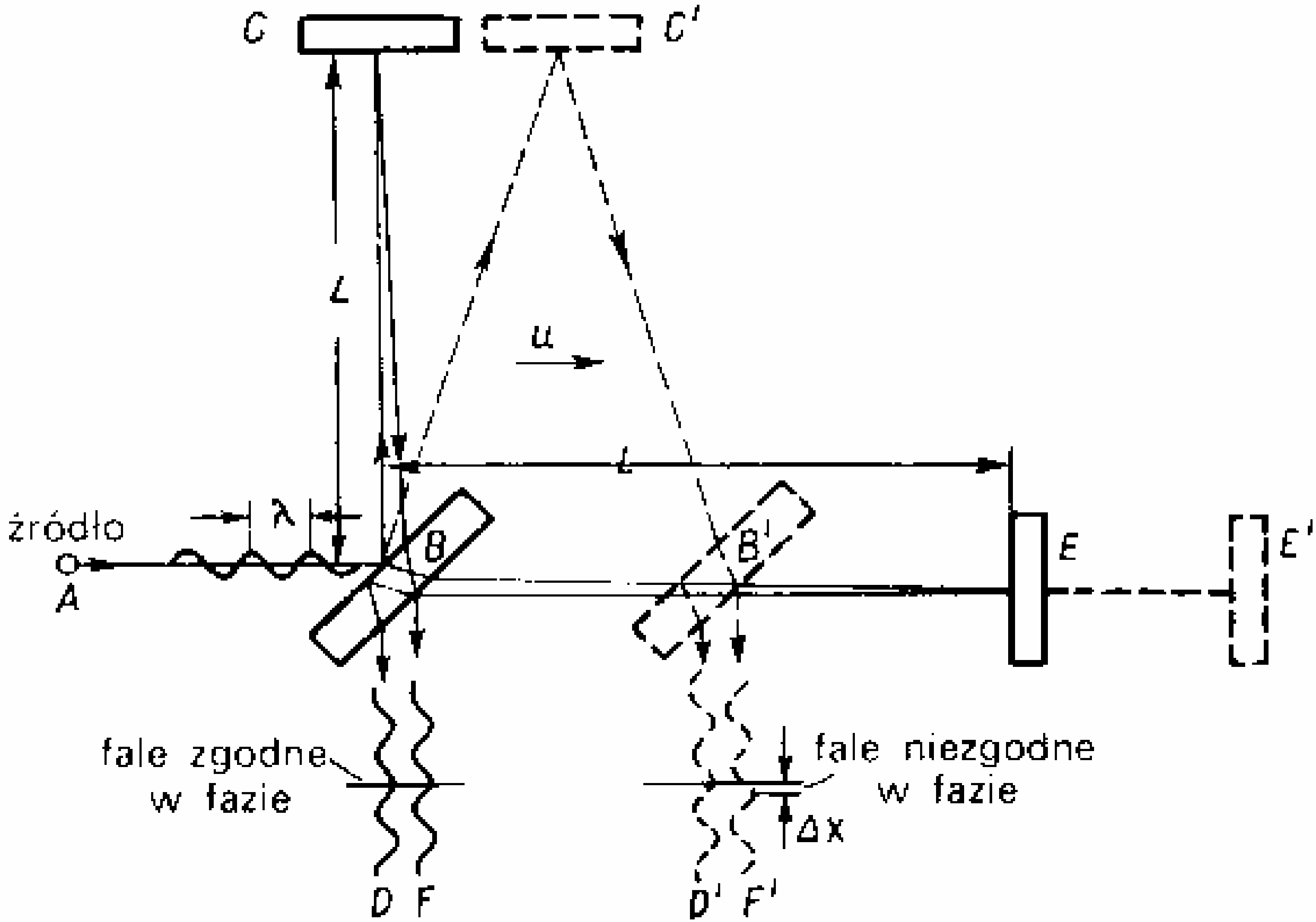
$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, y' = y, z' = z, \qquad t' = \frac{t - xu/c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

-Równania **dynamiki Newtona** okazują się niesymetryczne w stosunku do transformacji Lorentza (T.L.)

-Doświadczenie Michelsona - Morleya (M-M, 1887) $\Rightarrow$ negatywna próba wyznaczenia zmiany prędkości światła względem poruszającej się Ziemi



Interferometr Michelsona



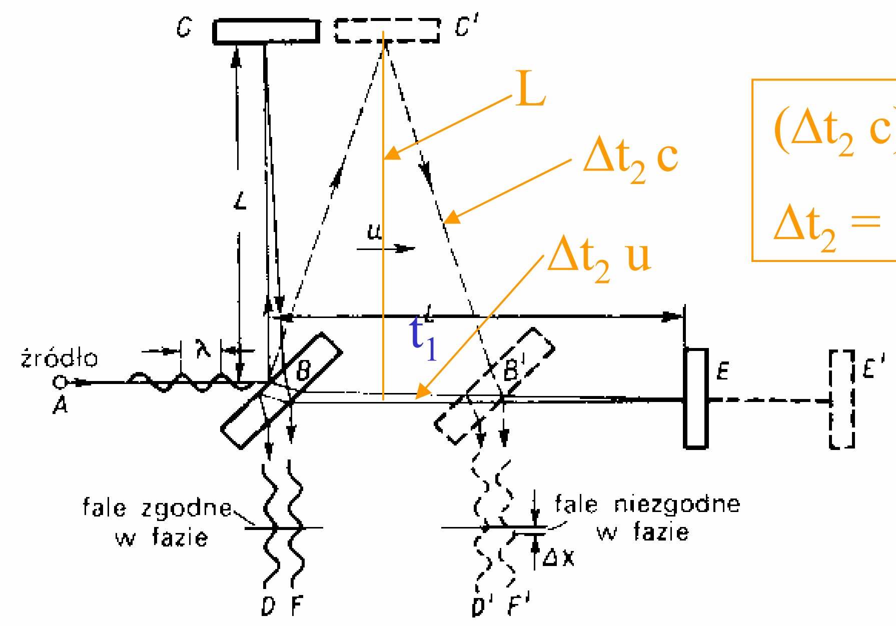
Doświadczenie Michelsona – Morleya
(Cleveland 1887)

$$t_1 = \frac{L}{c-u} + \frac{L}{c+u} = \frac{2Lc}{c^2-u^2} = \frac{2L}{c}\left(1-\frac{u^2}{c^2}\right)^{-1} \approx \boxed{\frac{2L}{c}\left(1+\frac{u^2}{c^2}\right)}$$

$$t_2 = \frac{2L}{\sqrt{c^2-u^2}} = \frac{2L}{c}\left(1-\frac{u^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \approx \boxed{\frac{2L}{c}\left(1+\frac{1}{2}\frac{u^2}{c^2}\right)}$$

$$u = 30\frac{km}{s} \Rightarrow \frac{u^2}{c^2} = 10^{-8}$$

$$(1+x)^n \approx (1+nx), \quad x<<1$$

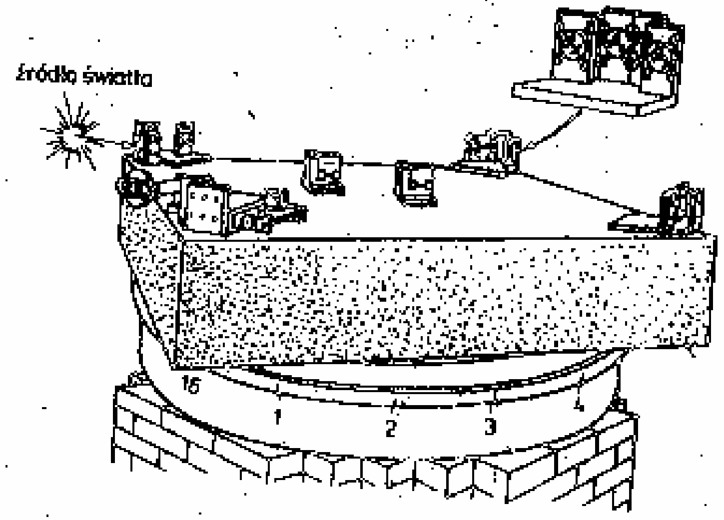


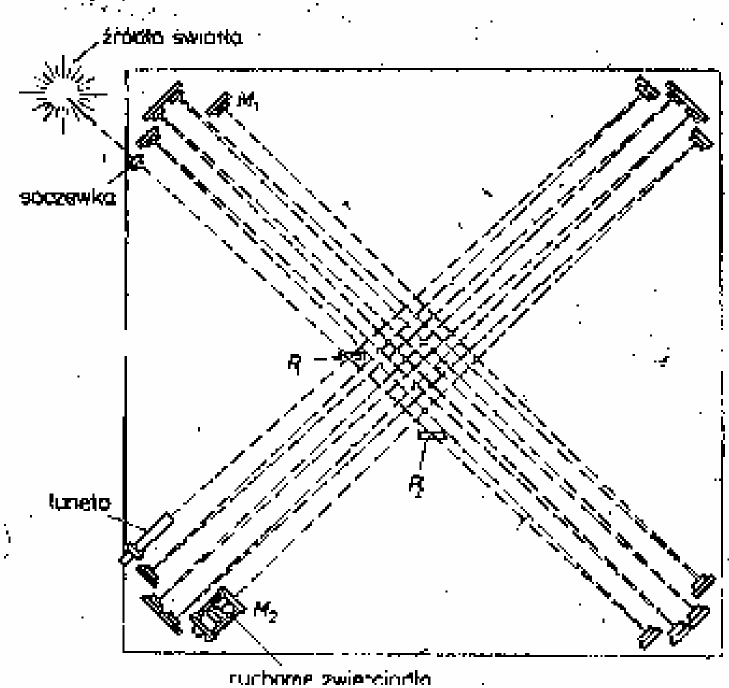
$$(\Delta t_2\, c)^2 = (L)^2 + (\Delta t_2\, u)^2$$

$$\Delta t_2 = \tfrac{1}{2}\, t_2$$

A.A.Michelson, Niemcy 1881 - ΔN = 0,4 prążka (L=1,2 m)

A.A.Michelson,E.W.Morley,USA - ΔN = 0,04 prążka (L=11 m)


źródło światła
15
1
2
3
4


źródło światła
soczewka
M_1
R
R_1
luneta
M_2
ruchome zwierciadło

- **G.F. Fitzgerald** proponuje „ryzykowną” hipotezę (sugestię?) wyjaśnienia negatywnego wyniku eksperymentu M-M:

skrócenie ramienia interferometru (t.j. przestrzeni) <u>w kierunku ruchu</u>;

- **A. Einstein** (1905) wprowadza dwa „relatywistyczne” postulaty i formułuje podstawy szczególnej teorii względności, co wyjaśnia w spójnej teorii m.in. także negatywny wynik eksperymentu M-M;

$$\Downarrow$$

w tym wprowadza <u>poprawkę do równań Newtona (na masę)</u> zapewniającą im niezmienniczość względem T.L:

$$\boxed{\mathrm{m} = \frac{m_o}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}}$$

Postulaty Alberta Eisteina

1. Zasada względności A. Einsteina

Wszystkie prawa przyrody są takie same

we wszystkich <u>inercjalnych</u> układach odniesienia (IUO)

(równania opisujące je są niezmiennicze [symetryczne]

względem transformacji między inercjalnymi układami odniesienia IUO;

transformację ruchu opisuje podstawienie Lorentza TL)

Zasada względności ruchu sformułowana została po raz pierwszy ***przez Galileusza***
(⇒ Transformacja Galileusza TG),

przyjęta następnie ***przez Newtona*** *⇒ wynikała bezpośrednio*

z niezmienniczości równań dynamiki Newtona w IUO względem T.G.

2. Zasada stałości prędkości światła

Prędkość światła w próżni jest taka sama we wszystkich IUO

(tj. nie zależy od ruchu źródeł i odbiorników ⇒ prędkość graniczna)

Elementy szczególnej teorii względności - konsekwencje i wnioski

Transformacja Lorentza (*wynika bezpośrednio z postulatu stałości szybkości światła c oraz jednorodności przestrzeni i czasu*):

oznaczenia:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}=\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}=\gamma \qquad \beta \le 1\,,\quad \gamma \ge 1$$

Przekształcenia transformacyjne Oxyz $\longrightarrow$ Ox'y'z' dla $\mathbf{u} = u\,\mathbf{e_x}$:

$x' = \gamma\,(x - ut)$, $y'=y$, $z'=z$ $t' = \gamma\,(t - xu/c^2)$,

Odwrotna transformacja Lorentza : Ox'y'z' $\longrightarrow$ Oxyz

$x = \gamma\,(x' + ut')$, $y=y'$, $z=z'$ $t = \gamma\,(t'+x'u/c^2)$ $(u \longrightarrow [-u])$

Konsekwencja 1

przestrzeń i czas **nie są** niezależne

Długość w różnych układach odniesienia

Długość ciała w spoczynku wynosi $l = (x_2 - x_1)$; jaka będzie jego długość w układzie **O**, gdy zacznie poruszać się ono w **O** z prędkością (v)?

Niech **O'** *będzie układem, w którym to ciało spoczywa (t.zn.* **O'** *porusza się w* **O** *z prędkością* u = v, → *mierzone w* **O'** *ciało ma długość l bo w nim spoczywa)*

ciało nieruchome w **O'** mierzon*e w* **O** ma długość: $l' = (x'_2 - x'_1)$,

gdzie:

$$x_1' = \frac{x_1 - vt_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad x_2' = \frac{x_2 - vt_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \longrightarrow \qquad x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

(*punkty x_1' oraz x_2' mierzone jednocześnie – w chwili t_o*)

lub $l' = l\gamma$, $\gamma < 1$ $\Rightarrow$ $\boxed{l < l'}$ (*ciało widziane z* **O** *!*)

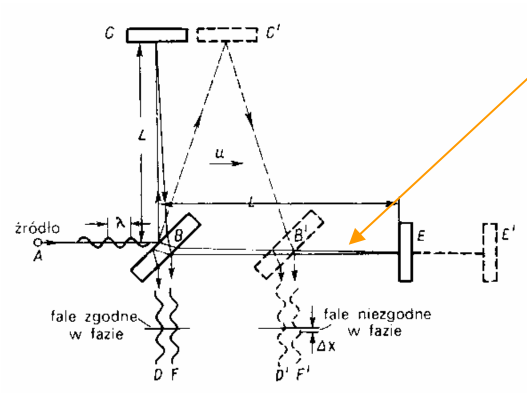
Wniosek:

długość poruszającego się ciała ulega skróceniu (*dla obserwatora w* **O**)

Konsekwencja 2 skrócenie odległości Fitzgeralda - Lorentza

Interpretacja wyniku eksperymentu Michelsona - Morleya

Obserwacja eksperymentu M-M „z zewnątrz”:



to ramię interferometru ulega skróceniu do L’ = L/γ, t.zn.

$$L' = L\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

wobec tego $$t_1 = \frac{2L'c}{c^2-u^2} = \frac{2Lc\sqrt{1-u^2/c^2}}{c^2(1-u^2/c^2)} = \frac{2L}{\sqrt{c^2-u^2}}$$

i jest równy $$t_2 = \frac{2L}{\sqrt{c^2-u^2}}$$

Wniosek: eksperyment M-M musiał dać wynik negatywny

Przekształcanie prędkości

odpowiednik (v=v'+u) *w T.G.*

Oznaczenia:

u = | u_x $\mathbf{e_x}$ | - prędkość O' względem O (*wzdłuż osi x*);

v, v'- prędkości ciała w O, O';

w układzie O' porusza się ciało z prędkością v'= |v' $\mathbf{e_x}$| ; $v'_y = v'_z = 0$;

start w początku obu układów; $x = v\,t$, $x' = v'\,t'$;

Prędkość ciała w O:

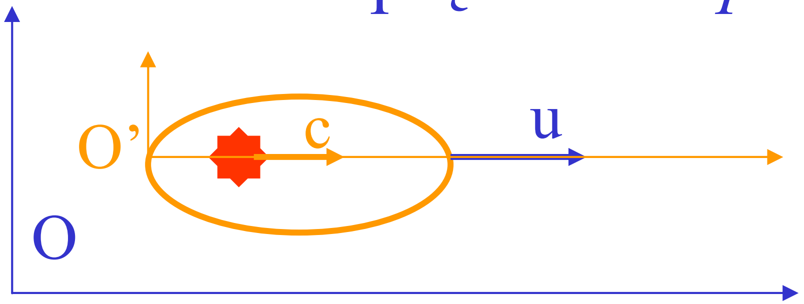
droga w O: $x = \gamma\,(x' + ut') = \gamma\,(v'\,t' + ut')$, $(x_o = 0)$

czas w O: $t = \gamma\,(t' + x'u/c^2) = \gamma\,(t' + v'\,t'\,u/c^2)$, $(t_o = 0)$

prędkość w O:

$$v_x = \frac{x}{t} = \frac{v't' + ut'}{t' + v't'(u/c^2)} \Rightarrow \boxed{v_x = \frac{v' + u}{1 + v'(u/c^2)}}$$

Przekształcanie prędkości - *przykład*



1.) Pojazd (O') porusza się z prędkością u=½ c i wysyła sygnał świetlny (c). Jaka jest prędkość tego sygnału w układzie O ?

Z Tr.Galileusza v = u+v'=1/2 c+c=1,5c

Z Tr. Lorentza $$v = \frac{v' + u}{1 + v'(u/c^2)}$$

$$v = \frac{c + 0{,}5c}{1 + c(0{,}5c/c^2)} = \frac{1{,}5c}{1 + 0{,}5} = c$$

2). Pojazd porusza się z prędkością u= c i wysyła sygnał świetlny (c)

$$v = \frac{c + c}{1 + c(c/c^2)} = \frac{2c}{1 + 1} = c$$

Jeśli $|v' \mathbf{e_x}| = v_x'$, $v'_y = |v' \mathbf{e_y}|$, $v'_z = |v' \mathbf{e_z}|$,

(*lecz nadal układ O' porusza się tylko wzdłuż Ox układu O*), to:

$$v_x = \frac{v'+u}{1+v'(u/c^2)}$$

$$v_y = v'_y \sqrt{1-\beta^2} \ ,$$

$$v_z = v'_z \sqrt{1-\beta^2}$$

Wniosek:

Ruch układu o kierunku Ox zmienia także prędkości ciała w Oy i Oz;

Odstęp czasu między zdarzeniami

W pewnym miejscu x' układu **O'** zachodzą dwa zdarzenia w chwilach t_1' i t_2' ; zdarzenia te dostrzega obserwator w **O** w chwilach:

$$t_1 = \frac{t_1' + x_1'(u/c^2)}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \qquad \text{oraz} \qquad t_2 = \frac{t_2' + x_1'(u/c^2)}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

Odstęp czasu między tymi zdarzeniami <u>w poruszającym się **O'**</u>

(*liczony w* **O**):

$$t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1'}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \qquad \text{lub} \quad \Delta t = \Delta t' \gamma \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta t > \Delta t'}$$

Wniosek: Upływ czasu w poruszającym się układzie jest wolniejszy (*poruszający się zegar* Δt' *„chodzi" wolniej*)

Czas zegara układowego nazywa się czasem własnym τ $\Rightarrow$ $\boxed{\Delta\tau < \Delta t}$

$(\Delta t' = \Delta\tau)$

Konsekwencja 3

Dylatacja czasu (czas własny układu jest najkrótszy)

Odstęp czasu między zdarzeniami

W pewnym miejscu x’ układu O’ zachodzą dwa zdarzenia w chwilach t_1’ i t_2’ ; zdarzenia te dostrzega obserwator w O w chwilach:

$$t_1 = \frac{t_1' + x_1'(u/c^2)}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \quad \text{oraz} \quad t_2 = \frac{t_2' + x_1'(u/c^2)}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

Odstęp czasu między tymi zdarzeniami w poruszającym się O’ (*liczony w* O):

$$t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1'}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

lub $\Delta t = \Delta t' \gamma$

$dt = dt' \gamma$,

$dt/dt' = \gamma$

Czas zegara układowego (*tu*: t’) nazywa się czasem własnym τ

($dt' = d\tau$)

$$\boxed{dt/d\tau = \gamma}$$

Jednoczesność

W układzie **O'** w pewnej chwili t_1' zachodzą równocześnie dwa zdarzenia w różnych miejscach x_1' oraz x_2';

Te zdarzenia obserwowane są w **O** w różnych chwilach

$$t_1 = \frac{t_1' + x_1'(u/c^2)}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \quad \text{oraz} \quad t_2 = \frac{t_1' + x_2'(u/c^2)}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

Wniosek: $t_1 \neq t_2$ $\longrightarrow$ zdarzenia jednoczesne w jednym układzie (*rozdzielone przestrzennie*) w innym układzie nie są równoczesne

Konsekwencja 4

$$\boxed{\text{względność pojęcia równoczesności oraz następstwa zdarzeń (\textit{zjawisk bez związku przyczynowego})}}$$

Masa i energia

Konieczna poprawka Einsteina na masę : $m = \dfrac{m_o}{\boxed{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}}$

wynosi $$\frac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} = \boxed{(1-\frac{v^2}{c^2})^{-\frac{1}{2}}}$$

Wniosek: *Masa relatywistyczna rośnie wraz z energią ciała*

ale $$\boxed{(1-\frac{v^2}{c^2})^{-\frac{1}{2}}} \approx (1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}+.......)$$

$\Rightarrow$ $m \cong m_o + \dfrac{1}{2} m_o v^2 (\dfrac{1}{c^2}) + \ldots$ lub $mc^2 = m_o c^2 + \frac{1}{2} m_o v^2 + \ldots\ldots$

Konsekwencja 5

Równoważność masy i energii: **$E = mc^2$**

mc^2 -*energia całkowita;* $m_o c^2$ – *energia spoczynkowa ciała*

Prawa dynamiki relatywistycznej

I. Newton:

$$\boxed{\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt}} \quad ; \quad \vec{p} = m\vec{v} \qquad (m=const)$$

W fizyce klasycznej (*Newtona*) masa ciała nie zależy od jego prędkości, więc pęd jest liniową funkcją prędkości;

masa relatywistyczna jest funkcją prędkości ciała:

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

więc **pęd relatywistyczny** jest nieliniową funkcją prędkości ciała (**v** *jest mierzone w tym samym układzie, co* **p**)

$$\vec{p}_r = m_r\vec{v} = \frac{m_o\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Wniosek: $\mathbf{p}_r \neq m\,\mathbf{a}$

Prawa dynamiki relatywistycznej

stąd również

$$\vec{p}_r = \frac{m_o \vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = m_r \vec{v}$$

$$\vec{p}_r = \frac{m_o}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \frac{d\vec{r}}{dt} = \boxed{m_o \frac{d\vec{r}}{d\tau}}$$

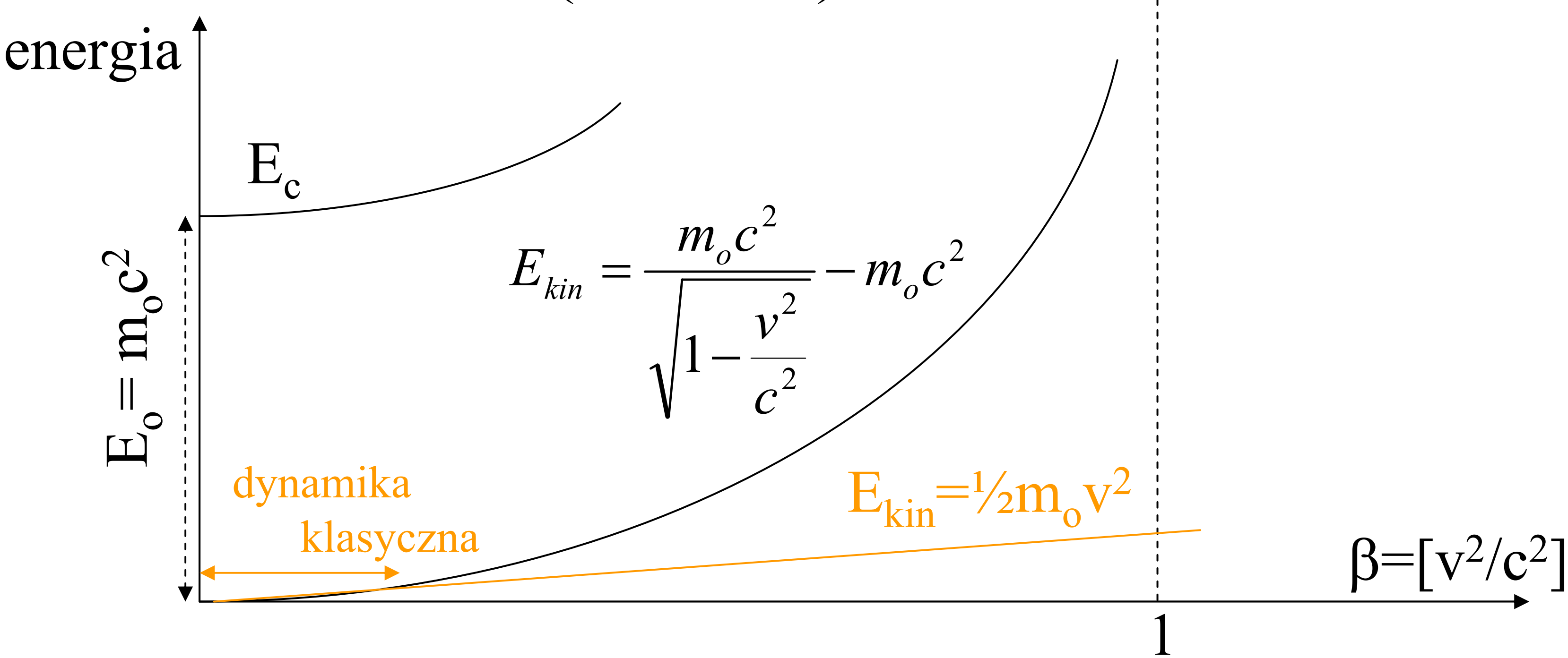
gdzie

$$d\tau = dt\gamma = dt\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$ jest czasem własnym poruszającej się cząstki

Energia relatywistyczna

$$E_c = mc^2 = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \qquad E_{kin} = (E_c - E_o) = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_o c^2 = m_o c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

$$dla : v << c : E_{kin} = m_o c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = m_o c^2 (1 + \tfrac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + ... - 1) \approx \tfrac{1}{2} m_o v^2$$



Relatywistyczna energia i pęd ($m=m_o$)

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

p/E = v/c^2 $\rightarrow$ v = pc^2/E $\rightarrow$ v^2 = p^{2}c^4/E^2

$$E^2 = \frac{m^2c^4}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

$$E^2 - \frac{p^2c^4}{E^2}\frac{E^2}{c^2} = m^2c^4 \longrightarrow (E^2 - p^2c^2) = m^2c^4 \Rightarrow inv.$$

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

Transformacja pędu i energii

Ox'y'z' $\longrightarrow$ Oxyz , $\dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}} = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma$, $m = m_o$

$$\left(dx = \gamma\,(x' + \beta\, cdt'),\quad dy = dy',\quad dz = dz' \quad cdt = \gamma\,(cdt' + \beta\, dx') \right) \Big/ \frac{m}{d\tau}$$

(m, τ - *niezmienniki*)

$$m\frac{dx}{d\tau} = \gamma\left(m\frac{dx'}{d\tau} + \beta mc\frac{dt'}{d\tau}\right)$$

$$m\frac{dy}{d\tau} = m\frac{dy'}{d\tau} \qquad m\frac{dz}{d\tau} = m\frac{dz'}{d\tau}$$

$$mc\frac{dt}{d\tau} = \gamma\left(mc\frac{dt'}{d\tau} + \beta m\frac{dx'}{d\tau}\right)$$

ale

$$m\frac{dx}{d\tau} = p_x; \quad \text{itd.}, \qquad dt/d\tau = \gamma \rightarrow \quad mc\frac{dt}{d\tau} = \frac{E}{c}$$

$$\boxed{\begin{aligned} p_x &= \gamma\left(p'_x + \beta\frac{E'}{c}\right), \\ p_y &= p'_y \qquad\qquad p_z = p'_z \\ \frac{E}{c} &= \gamma\left(\frac{E'}{c} + \beta p'_x\right) \end{aligned}}$$

odpowiedniki współrzędnych $(x,y,z,ct) \rightarrow (p_x, p_y, p_z, E/c)$ transformują się tak samo – i w czterowymiarowej przestrzeni o analogicznych własnościach tworzą czterowektor energii-pędu,

Wielkości relatywistyczne energii i pędu spełniają prawa zachowania we wszystkich układach inercjalnych

Interwał

Z konsekwencji 1 :

- czas i przestrzeń klasyczna są częściami jednej całości

⇒ czasoprzestrzeni;

- „zwykłe” wektory stają się czterowektorami (x,y,z,ct);
- „zwykła” odległość (metryka euklidesowa) $\Delta l^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$

przechodzi w interwał Δs : $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$

lub ⇒ $\Delta s = \sqrt{c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2}$

Jak transformuje się interwał przy przejściu z O do O' ?

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

podstawiając wzory tranformacyjne TL dostaje się:

$$\Delta s^2 = \Delta s'^2 = inv.$$

Wniosek: Interwał jest niezmiennikiem w układach inercjalnych (TL)

Podobnie metryka **w przestrzeni pędu i energii**:

$$(E/c)^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2 = inv. , \qquad \textit{ponieważ } (E^2/c^2 - p^2) = m^2c^2$$

Odległość w czasoprzestrzeni = interwał Δs jest niezmiennikiem tr.L,

Także długość dowolnego czterowektora a(x,y,z,ct) jest niezmiennikiem

$$a^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 = -\Delta s^2$$

Analogicznie jak w przestrzeni klasycznej, kwadrat długości wektora (*lub odległości 2 punktów*) w czasoprzestrzeni można wyrazić

$$|a|^2 = \mathbf{a}\ \mathbf{a} = \sum \Delta a_i^{\ 2} = \Delta a_x^{\ 2} + \Delta a_y^{\ 2} + \Delta a_z^{\ 2} = \mathit{inv}.$$

➡ czterowektor położenia x_i :

$$x_i = (x,y,z,\ i\ ct)$$

bowiem: $|x|^2 = \sum \Delta x_i^{\ 2} = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 t^2 = -\Delta s^2$

analogicznie czterowektor energii-pędu:

$$p_i = (p_x\ , p_y\ , p_z\ , i\ [E/c]\ )$$

➡ $|p|^2 = \sum \Delta p_i^{\ 2} = p_x^{\ 2} + p_y^{\ 2} + p_z^{\ 2} - (E/c)^2$ $\quad (= -m^2c^4 = \mathit{inv}.)$

Interwał $\Delta s = \sqrt{c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2}$ może być rzeczywisty, lub urojony,

lub równy zeru ⇨ **decyduje o relacji wzajemnej zjawisk**;

⇨ **jest niezmiennikiem T.L.**, więc interwał rzeczywisty (urojony) jest rzeczywisty (urojony) w każdym inercjalnym UO;

Dla interwału rzeczywistego (*zdarzenia potencjalnie powiązane*):

$$c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta l'^2 > 0, \Longrightarrow$$

możliwe jest więc $\Delta l' = 0$ przy $\Delta l \neq 0$,

t.zn. zdarzenia w różnych miejscach O są w jednym miejscu O'

niemożliwe jest jednak $\Delta t' = 0$; jest to interwał czasopodobny

Dla interwału urojonego (*zdarzenia bez wzajemnego wpływu*)

$$c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta l'^2 < 0,$$

możliwe jest więc $\Delta t' = 0$ przy $\Delta t \neq 0$,

t.zn. zdarzenia niejednoczesne w O są jednoczesne w O';

niemożliwe jest jednak $\Delta l' = 0$; jest to interwał przestrzennopodobny

Jak transformuje się interwał przy przejściu z O do O' ?

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

podstawiając wzory tranformacyjne TL dostaje się:

$$\Delta s^2 = \Delta s'^2 = inv.$$

Wniosek:

$\boxed{\text{Interwał jest niezmiennikiem w układach inercjalnych (TL)}}$

Związek między **czasem własnym** układu a **interwałem**

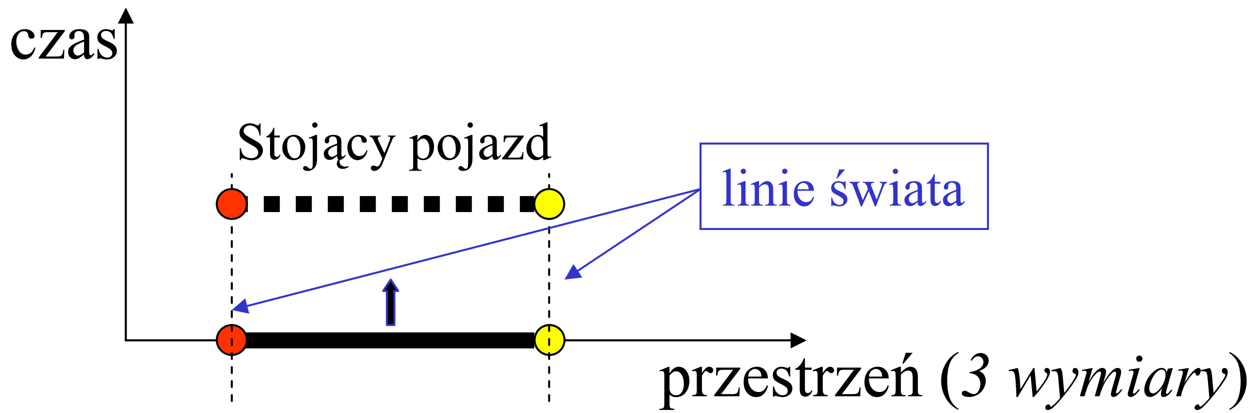
$$\Delta\tau = \frac{\Delta t}{\gamma} = \Delta t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

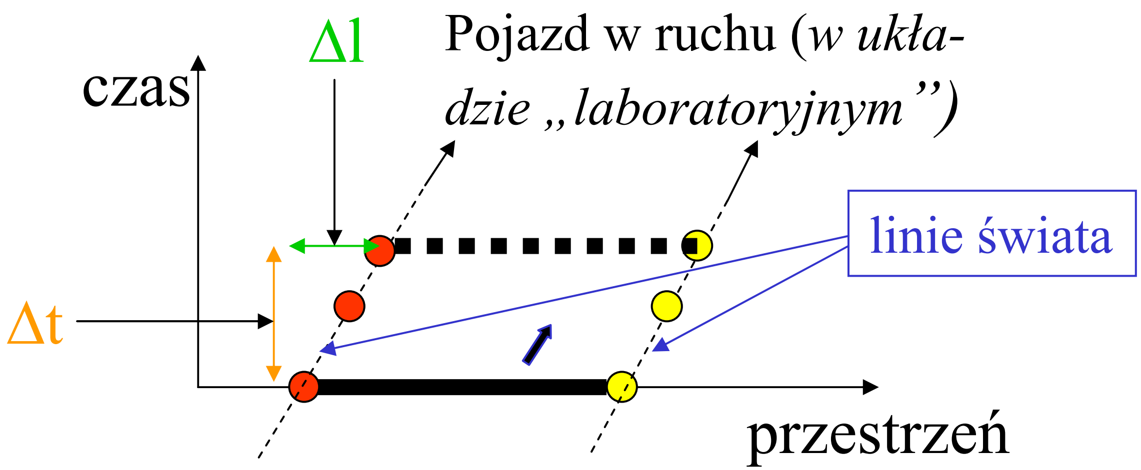
$$\Delta\tau = \frac{1}{c}\sqrt{c^2\Delta t^2 - v^2\Delta t^2} \quad , \quad \Rightarrow \quad \Delta\tau = \frac{1}{c}\sqrt{c^2\Delta t^2 - \Delta l^2} \quad ,$$

$\Rightarrow$ $\Delta\tau = 1/c \;\; \Delta s'$

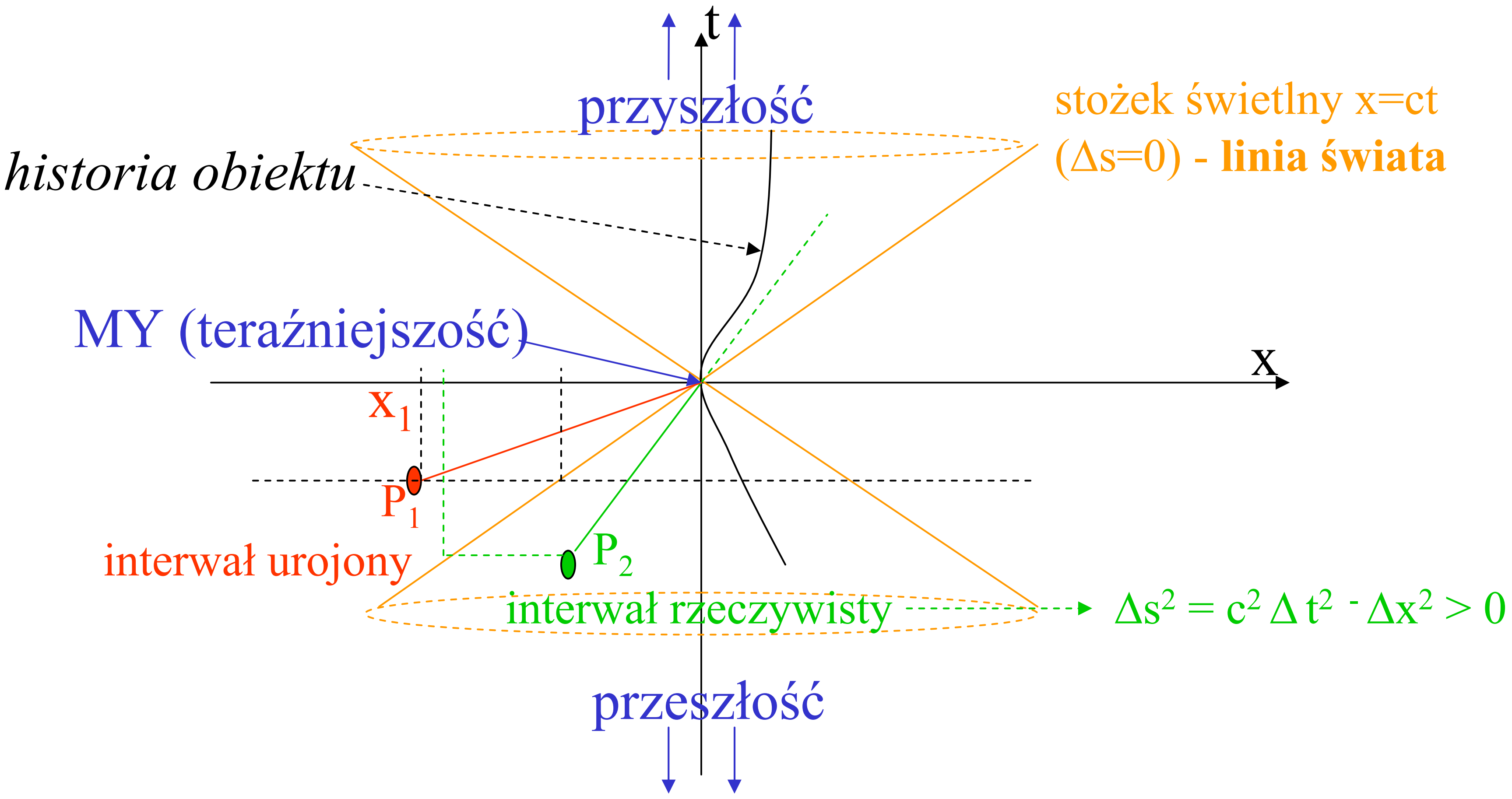
Wniosek: **Czas własny układu jest** również **niezmiennikiem** we wszystkich inercjalnych układach odniesienia

Hermann Minkowski: czasoprzestrzeń





Czasoprzestrzeń wokół nas



Konsekwencje teorii względności

- Przestrzeń i czas <u>nie są</u> niezależne , są powiązane T.L.

- Stała prędkość światła, niezależna od ruchu

  $\Rightarrow$ c (*w próżni*) to prędkość graniczna

- niezmienniczość praw fizyki w układach inercjalnych poruszających się z dowolną szybkością

  niezmienniczość równań Maxwella;

  „korekta" równań dynamiki Newtona ;

  (dla v_I = 8 km/s poprawka Δm < 1/2 000 000 000)

- względność pojęcia równoczesności (*zjawisk bez związku przyczynowego*)

- dylatacja czasu

  $\Delta\tau<\Delta t'$ - upływ czasu własnego jest krótszy (czas płynie wolniej) niż czasu układu poruszającego się

- skrócenie odległości Fitzgeralda-Lorentza

Filozoficzne konsekwencje teorii względności

- Lekcja pokory - ograniczoność percepcji świata
  „wszystko może okazać się błędne!”

- Granice intuicyjnego rozumienia zjawisk (*paradoks bliźniąt*)

- Znaczenie symetrii praw fizyki