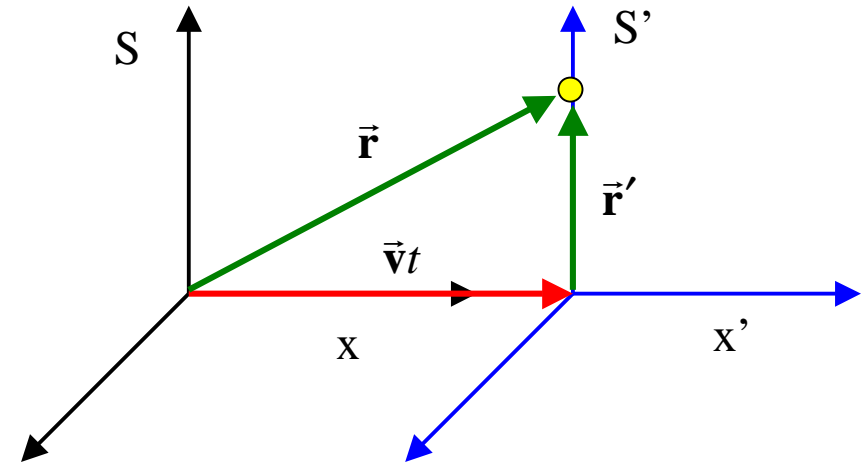
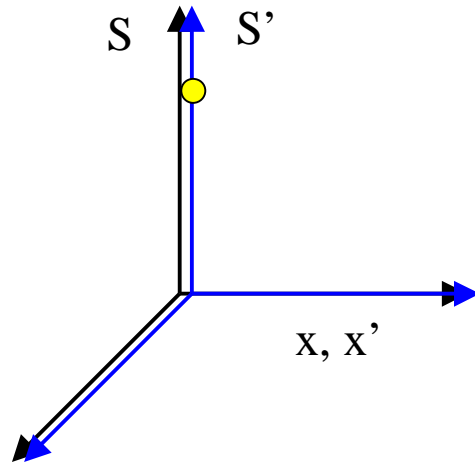


Transformacja Galileusza (1564-1642)



$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

Zasada względności Galileusza: prawa mechaniki są jednakowe we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.

$$\vec{a}' = \vec{a}$$

$$\vec{F}' = \vec{F}$$

Uwaga: newtonowskie dodawanie prędkości: $\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v}$

Problem ze światłem:

$$c \approx 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

ale względem jakiego układu?

Przypuszczano, że względem Kosmosu, dokładniej: eteru kosmicznego.

Einstein: „to narusza zasadę względności”.

Obserwator w układzie inercyjnym mógłby odróżnić swój stan spoczynku od ruchu jednostajnego, mierząc prędkość światła.

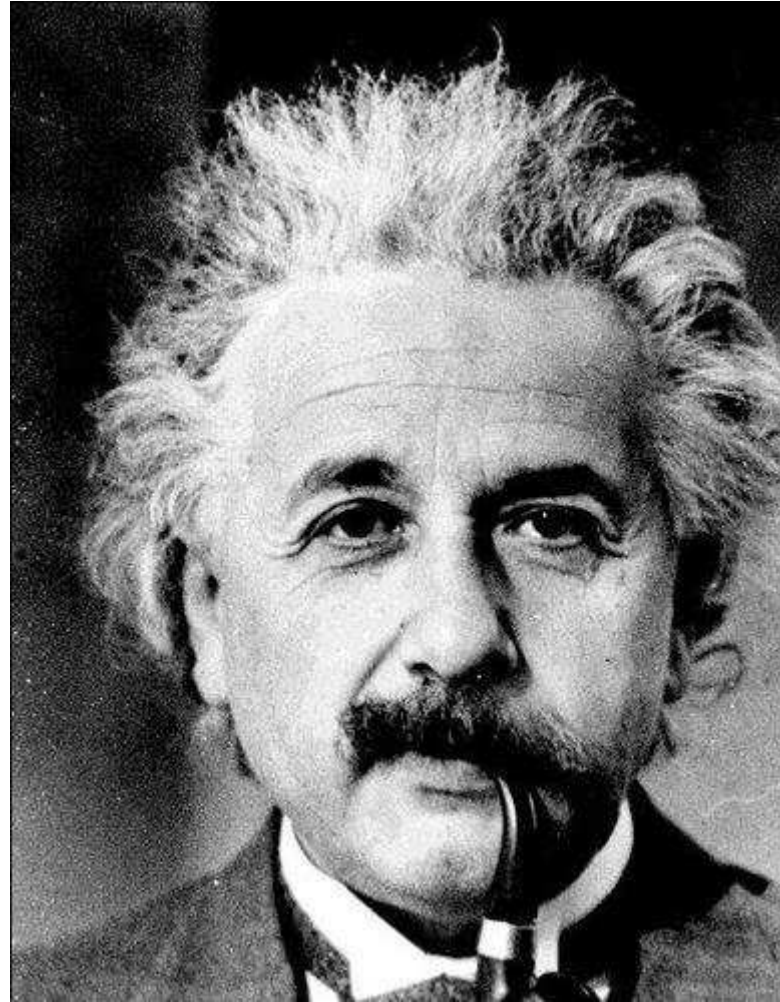
Postulaty Einsteina – podstawa szczególnej teorii względności

- I. Ruch jest względny, tzn. żadne doświadczenie fizyczne nie jest w stanie wykazać różnicy między spoczynkiem a ruchem jednostajnym prostoliniowym układu odniesienia (zasada względności Einsteina).
- II. Prędkość światła jest stała we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.

II postulat jest sprzeczny z transformacją Galileusza, a konkretnie z prawem dodawania prędkości

$$c + v = c \quad ???????$$

Konieczna jest nowa transformacja, jeżeli te postulaty są prawdziwe.



Albert Einstein
(1879-1955)
(źródło – Internet)

Badania doświadczalne

Eksperyment Michelsona-Morleya

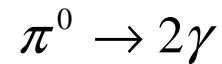
Specjalny przyrząd, interferometr Michelsona-Morleya, pędzi razem z Ziemią, $v = 30 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Oczekiwanie: prędkość światła dodaje się wektorowo.

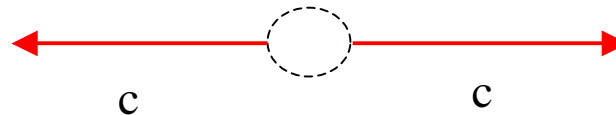
Wynik: negatywny. (Nagroda Nobla 1907)

Eksperyment w CERNie 1964 rok

Rozpad mezonu

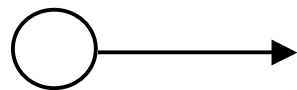


I. w spoczynku

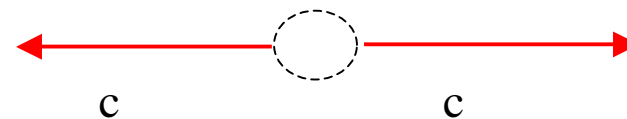


II. w ruchu

generator
mezonów

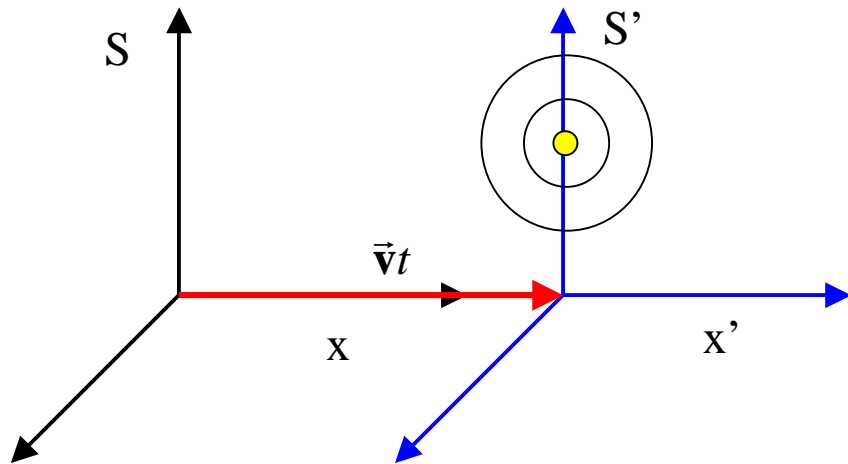


$$v=0,99975c$$



Transformacja Lorentza

Wynika ona z warunku, aby powierzchnia falowa światła była sferyczna w każdym inercjalnym układzie odniesienia.



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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

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

$$x^2 + y^2 + z^2 = (ct)^2 \text{ i również } x'^2 + y'^2 + z'^2 = (ct')^2$$

zdefiniujmy czynnik Lorentza γ

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

inny zapis transformacji Lorentza

$$x' = \gamma(x - vt)$$
$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)$$

transformacja odwrotna

$$x = \gamma(x' + vt')$$
$$t = \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right)$$



Hendrik Antoon Lorentz
(1853-1928)

(źródło – Internet)

Relatywistyczne dodawanie prędkości

$$dx = \gamma(dx' + v dt')$$

$$dt = \gamma\left(dt' + \frac{v}{c^2} dx'\right)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\gamma(dx' + v dt')}{\gamma\left(dt' + \frac{v}{c^2} dx'\right)} = \frac{\frac{dx'}{dt'} + v}{1 + \frac{v}{c^2} \frac{dx'}{dt'}}$$

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v u'}{c^2}}$$

(jeśli $u'=c$, to $u=c$ także).

Względność równoczesności

$$\Delta t = \gamma\left(\Delta t' + \frac{v}{c^2} \Delta x'\right)$$

Jeżeli $\Delta x' = 0$ i $\Delta t' = 0$, to $\Delta t = 0$. Zdarzenia są równoczesne w obu układach.

Jeżeli $\Delta x' \neq 0$ i $\Delta t' = 0$ (zdarzenia równoczesne w S' , ale w różnych miejscach), to $\Delta t = \gamma \frac{v}{c^2} \Delta x' \neq 0$.

Zdarzenia te nie są równoczesne w S . Nawet ich kolejność nie jest ustalona (Δt może być >0 lub <0).

Czyżby naruszenie zasady przyczynowości?

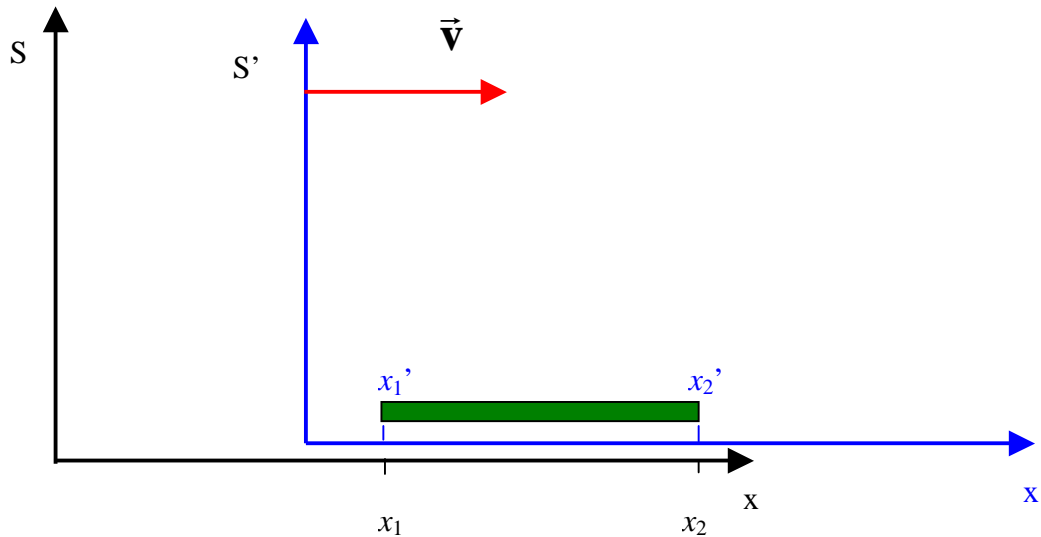
Przyczynowość w czasoprzestrzeni

Dla każdego obserwatora istnieje zbiór zdarzeń, który jest jego bezwzględną przeszłością. Odległości między tymi zdarzeniami są typu czasowego. Transformacja Lorentza nie może zmienić charakteru tej odległości. Oznacza to, że np. jeżeli najpierw mieliśmy studniówkę, a potem maturę, to żaden obserwator we Wszechświecie nie może zaobserwować odwrotnej kolejności tych zdarzeń.

Istnieje też ogromny zbiór zdarzeń tak odległych, że odległości między nimi są typu przestrzennego. Np. wybuchy dwóch supernowych, A i B, mogą być zaobserwowane z Ziemi jako równoczesne. Dla kosmonautów poruszających się wzdłuż linii AB z prędkością v , ale w przeciwnych kierunkach, nie będą one równoczesne. Jeden zaobserwuje wcześniej wybuch A, następnie B. Drugi odwrotnie: zaobserwuje wcześniej wybuch B, później A. Nie ma to jednak żadnego wpływu na historię Kosmosu (wybuch A nie mógł wpłynąć na wybuch B ani odwrotnie, ponieważ sygnał o wybuchu rozchodzi się z prędkością c , nie natychmiastowo). Transformacja Lorentza nie zmienia przestrzennego charakteru odległości między tymi zdarzeniami.

Podsumowując: względność równoczesności ma ograniczony charakter i nie narusza zasady przyczynowości.

Relatywistyczne skrócenie długości (kontrakcja Lorentza)



listwa o długości l_0 spoczywa w S' (l_0 – jej długość własna)

jej długość mierzona w S' : $l' = x'_2 - x'_1$ $l' = l_0$

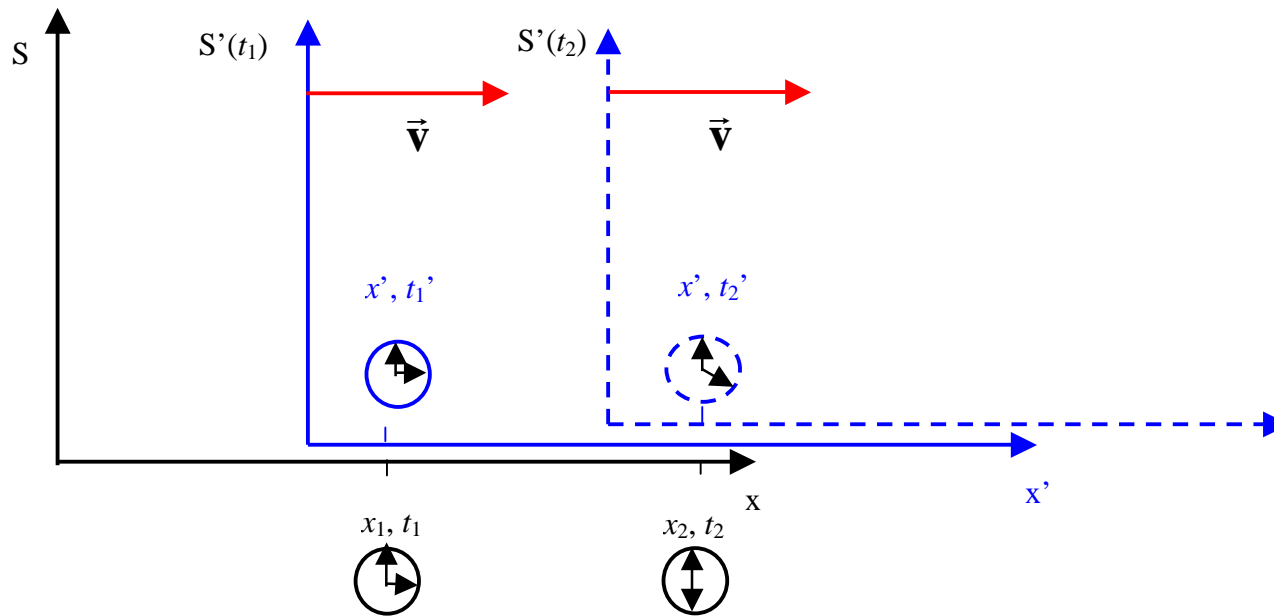
jej długość mierzona w S : $l = x_2 - x_1$ w tej samej chwili czasu $t_2 = t_1$

$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$l' = x'_2 - x'_1 = \gamma(x_2 - vt_2) - \gamma(x_1 - vt_1) = \gamma(x_2 - x_1) = \gamma l, \quad \text{tzn. } l_0 = \gamma l, \quad \text{stąd } l = \frac{l_0}{\gamma}$$

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad \text{więc } \boxed{l < l_0}$$

Relatywistyczne wydłużenie czasu (dylatacja czasu)



wskazania zegara spoczywającego w S' porównujemy z dwoma różnymi zegarami spoczywającymi w S

$$t = \gamma \left(t' + \frac{v}{c^2} x' \right)$$

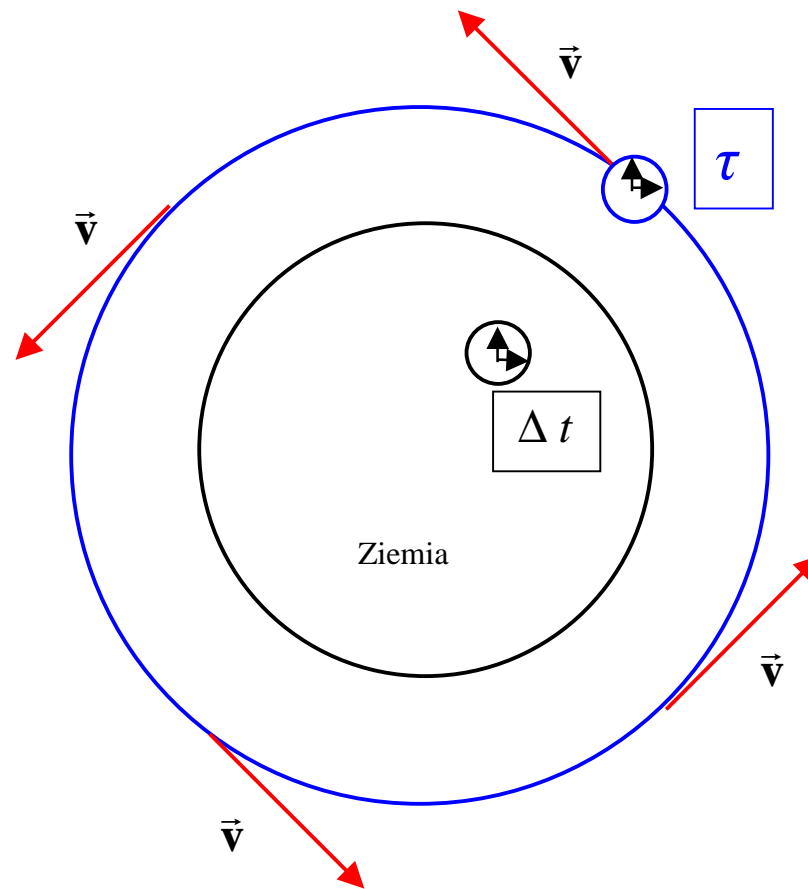
$$t_1 = \gamma \left(t_1' + \frac{v}{c^2} x' \right)$$

$$t_2 = \gamma \left(t_2' + \frac{v}{c^2} x' \right)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \gamma \left(t_2' + \frac{v}{c^2} x' \right) - \gamma \left(t_1' + \frac{v}{c^2} x' \right) = \gamma (t_2' - t_1') = \gamma \Delta t', \quad \Delta t' \equiv \tau \quad \text{czas własny}$$

$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \text{więc} \quad \boxed{\Delta t > \tau}$$

**2. bezpośredni pomiar czasu przy pomocy zegarów atomowych (lot dookoła świata).
Jeden zegar został w laboratorium, drugi (identyczny) latał samolotem dookoła Ziemi.**



Opóźnienie zegara w ruchu to jest różnica czasów $(\Delta t) - \tau$

wartość zmierzona: ok. 203 ns

Zgodność z teorią względności w granicach niepewności pomiarowej.

Oznacza to, że zegary w ruchu idą wolniej.