

# Relatywistyka

Dr inż. Daniel Budaszewski

# Mechanika klasyczna

- Ruch ciał zawsze określany jest względem innych ciał materialnych – ruch względny,
- 2 typy układów odniesienia:
  - w których obowiązuje zasada bezwładności (układ inercjalny),
  - nie obowiązuje zasada bezwładności (układ nieinercjalny),



*Czy układ związany z Ziemią jest inercjalny?*

-tak, o ile nie uwzględniamy ruchu obrotowego Ziemi i ruchu orbitalnego wokół Słońca, ( $3,4 \text{ m/s}^2$  i  $0,6 \text{ m/s}^2$ )

-wówczas nie jest spełniona zasada bezwładności

*Lepszym układem inercjalnym jest układ związany z grupą gwiazd*

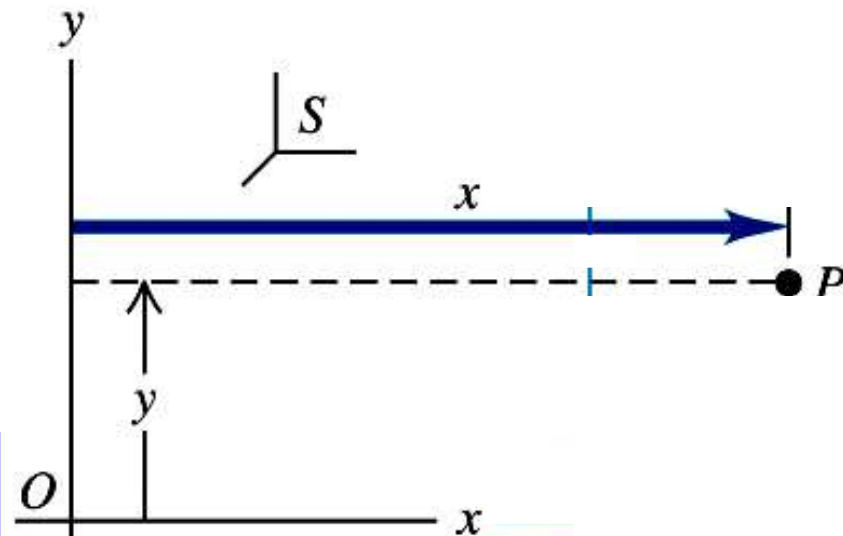
# Mechanika klasyczna

I zasada dynamiki Newtona to w zasadzie uogólnienie II zasady,

$$\mathbf{F} = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{a} = \mathbf{0}$$

*Istnieje układ inercjalny, tzn. taki, w którym ciało spoczywa lub porusza się ruchem prostoliniowym i jednostajnym, jeżeli wypadkowa siła działająca na to ciało równa się zero.*

# Układ odniesienia w sensie Galileusza



*Możemy wyrazić współrzędne jednego układu odniesienia przez współrzędne drugiego układu*

# Transformacja Galileusza

$$x = x' + ut \quad y = y' \quad z = z'$$

## Transformacja prędkości

$$v_x = v'_x + u$$

## Transformacja siły

$$F_x = F'_x$$

# Transformacja siły

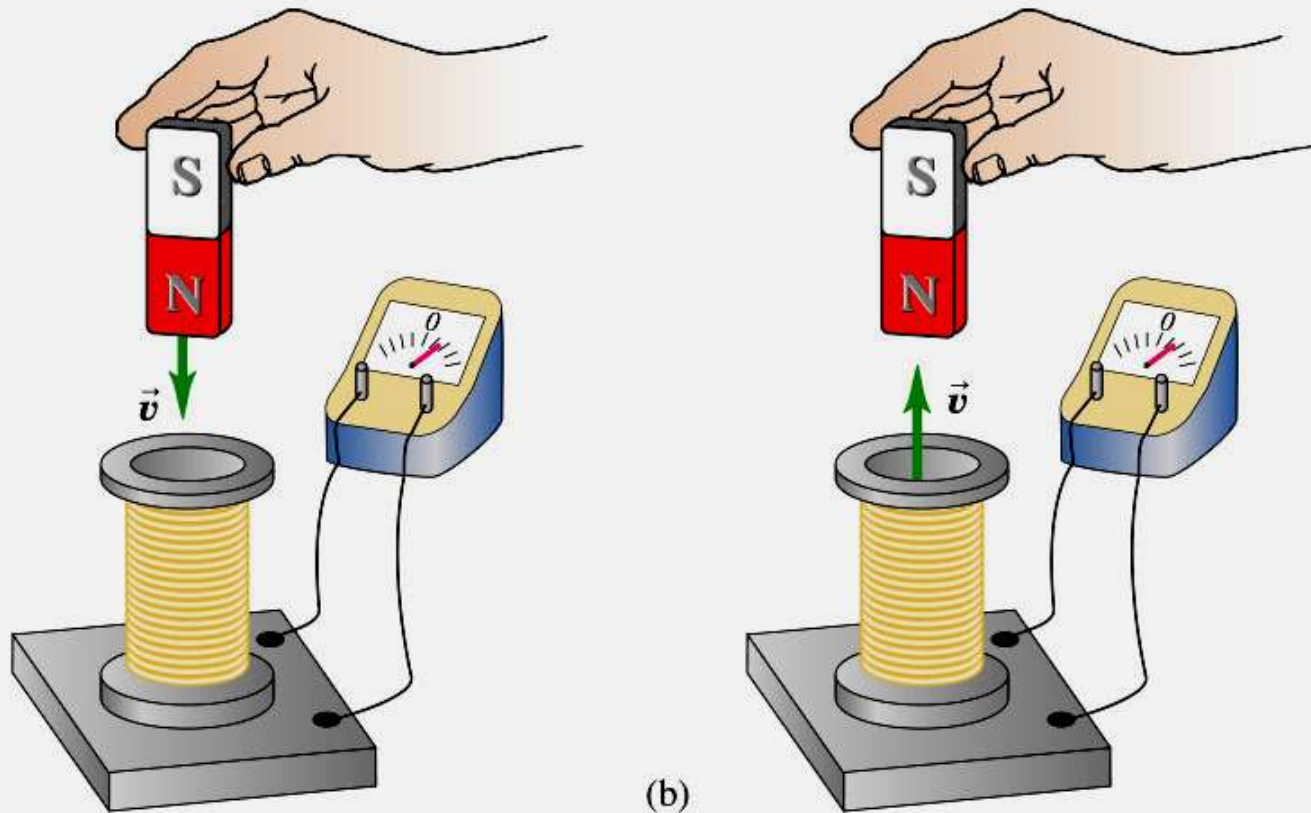
$$F_x = F'_x$$

***Siła jest niezmiennicza względem transformacji Galileusza***

Pod wpływem działania określonej siły na sprężynę jej wydłużenie będzie takie samo w jednym i drugim inercyjnym układzie odniesienia

***Zasada względności Galileusza: w układach inercjalnych, w tych samych warunkach, zjawiska mechaniczne przebiegają jednakowo***

# Mechanika klasyczna



**Ta sama SEM**

Co jeśli prędkości będą zbliżone do prędkości światła?

Prędkość światła =  $2,979\ 246 \times 10^8$  m/s

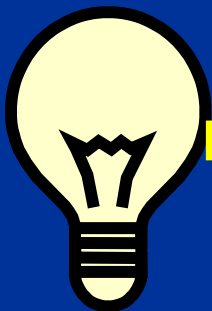


$v_1$



$v_1$

$$v_{1,2} = v_1 + v_1 = 2v_1$$



$2c$  ?





# Co jeśli prędkości będą zbliżone do prędkości światła?

***Mechanika Newtonowska jest prawidłowa tylko dla prędkości znacznie mniejszych od  $c$***

$$v \ll c$$

**Słuszna jest teoria mechaniki relatywistycznej**

(mechanika Newtonowska jest uogólnieniem mechaniki relatywistycznej dla warunku  $v \ll c$ )

**Po co zajmować się relatywistyką ?**

# Dlaczego relatywistyka?

1. Fizyka i światło (optoelektronika, optyka, astronomia)
2. Elektrodynamika i jej zjawiska
3. Fizyka jądrowa i cząsteczki (fotony, neutrino –prędkość światła)
4. Badania wszechświata,
5. Fizyka kwantowa i relacje między energią, masą, pędem
6. Wzór Einsteina  $E=mc^2$

## **Teoria względności budzi jednak niechęć**

Trudno ją zaakceptować, bo brzmi nielogicznie

(Paradoks bliźniąt, dylatacja czasu, kontrakcja długości)

### **Mechanika klasyczna nie potrafi wyjaśnić:**

- właściwości światła,
- zjawisk elektrodynamicznych,
- fizyki cząstek subatomowych,
- relacji między energią, masą i pędem,

# Postulaty Einsteina (1905 r.)

**Pierwszy postulat:** Prawa fizyki są takie same we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.

**Drugi postulat:** Prędkość światła w próżni jest stała we wszystkich inercjalnych układach odniesienia i jest niezależna od ruchu źródła.

# Implikacje postulatów Einsteina

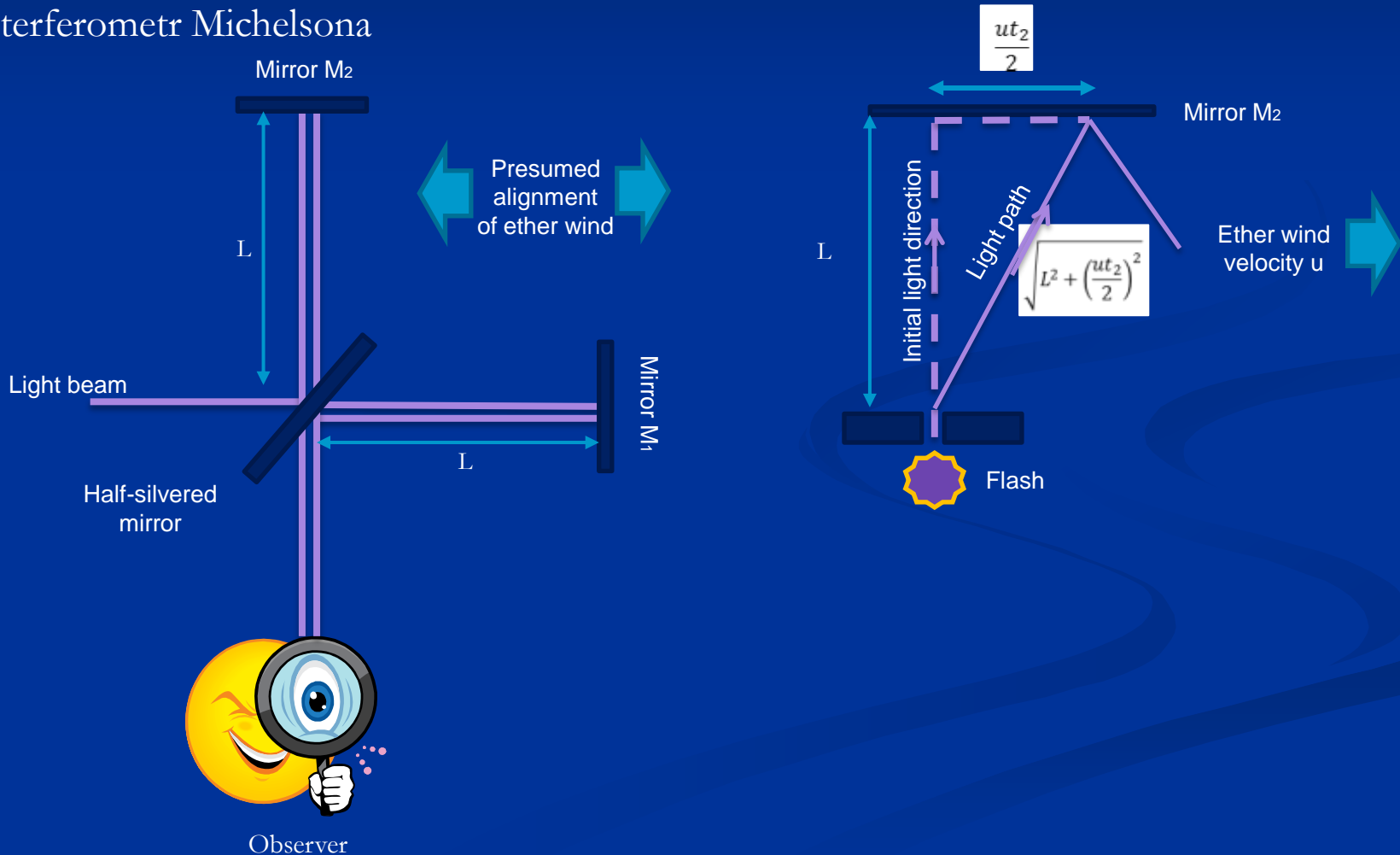
1. Problem jednoczesności w różnych układach odniesienia,
  - Dwa zdarzenia jednoczesne w jednym układzie odniesienia nie muszą być jednoczesne w drugim inercyjnym układzie.
2. Problem pomiarów czasu i długości.
  - Dwaj eksperymentatorzy poruszający się w dwóch układach inercyjnych nie muszą uzyskać tych samych wyników.
3. Drugie prawo Newtona
  - Aby spełnione były zasady zachowania drugie prawo Newtona musi być zweryfikowane.

# Implikacje postulatów Einsteina

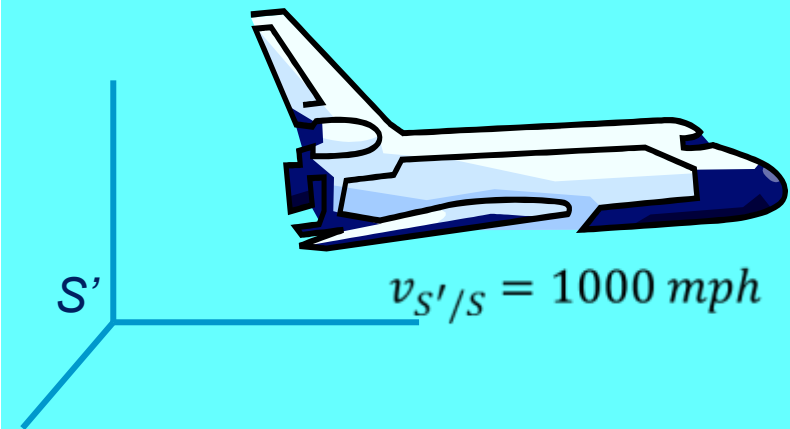
1881 r. Albert Michelson i Edward Morley

Hipoteza istnienia eteru – ośrodka, w którym istnieje wszechświat.

Interferometr Michelsona



# Implications of the Einstein's postulates



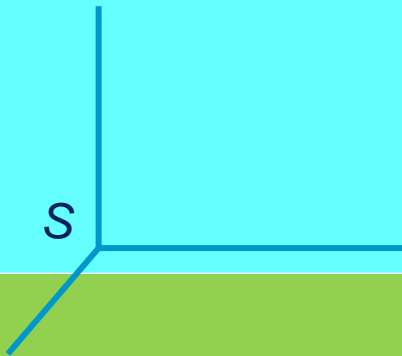
$$v_{M/S'} = 2000 \text{ mph}$$



$$v_{M/S} = 2000 \text{ mph} + 1000 \text{ mph}$$

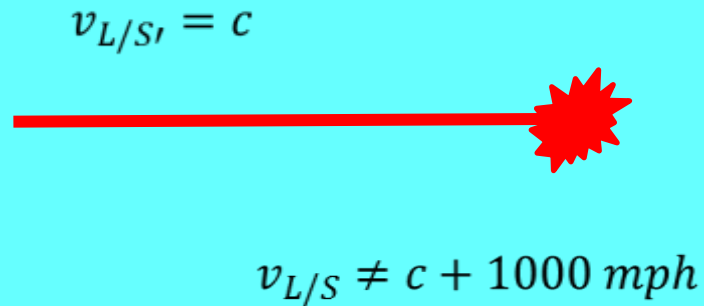
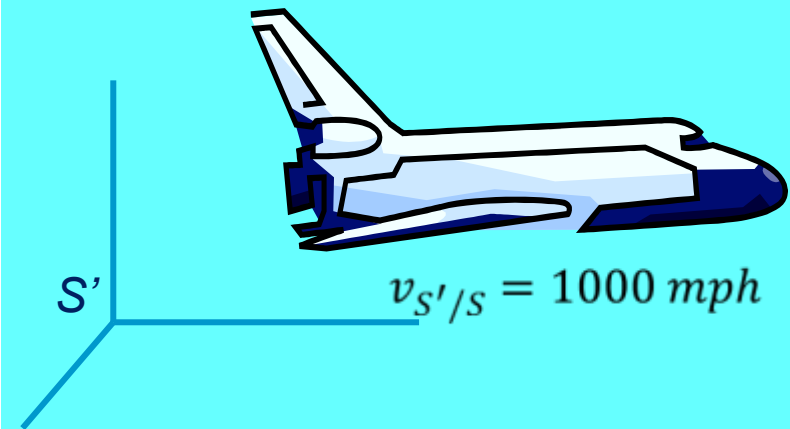


prawidłowo

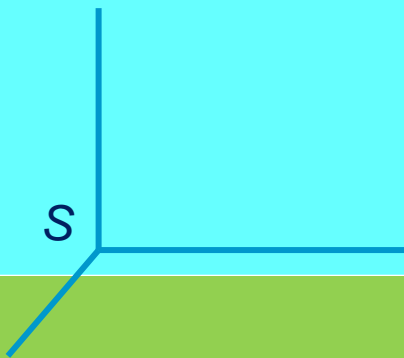


Obserwator

# Implications of the Einstein's postulates

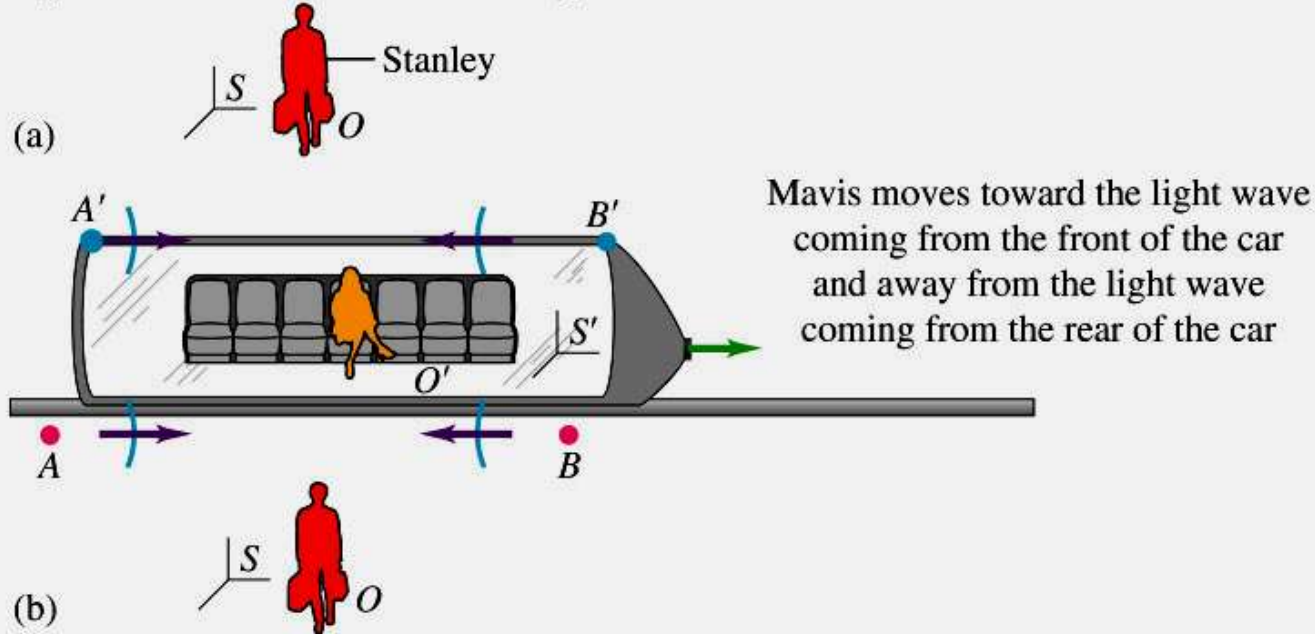
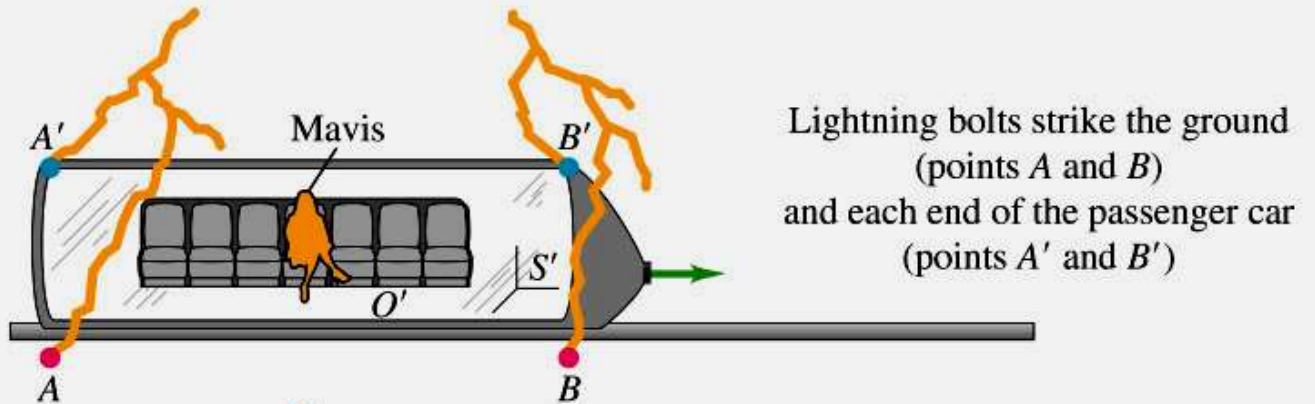


**X** nieprawidłowe

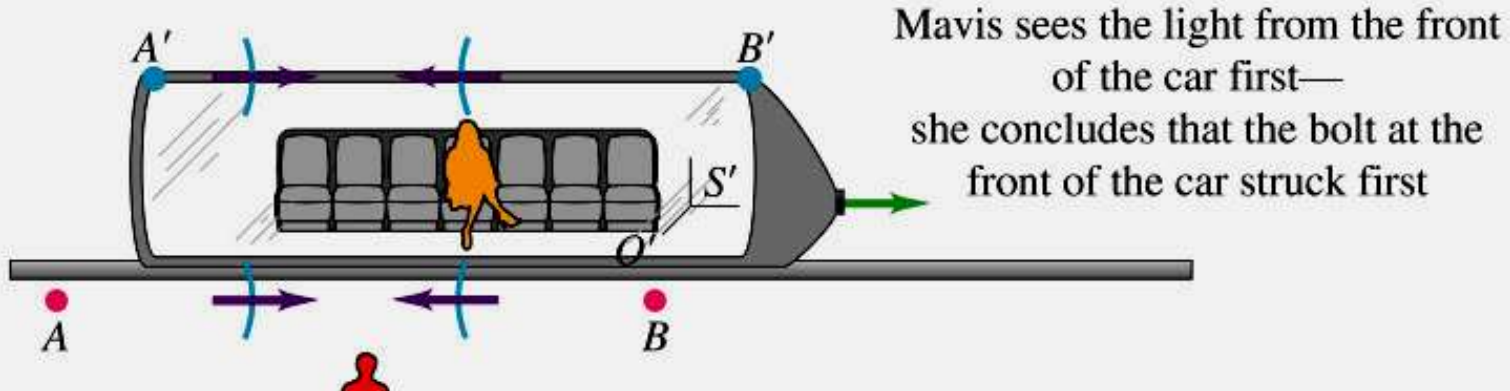


Obserwator

# Względność jednoczesności

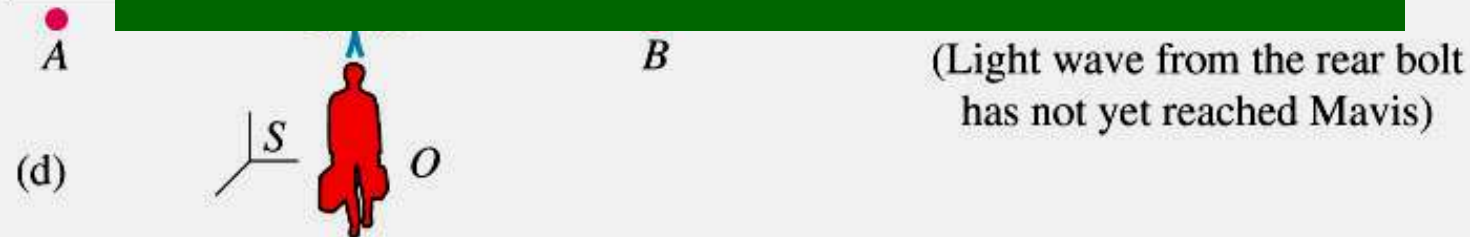




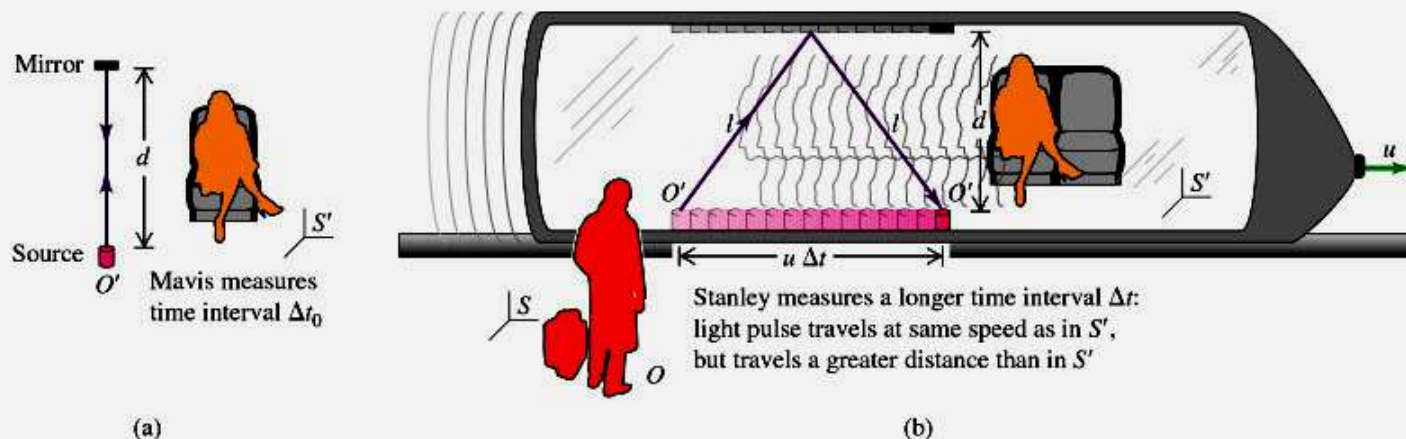


(c) **To, czy zjawiska w różnych inercjalnych układach odniesienia są jednoczesne, zależy od stanu ruchu obserwatora**

the two  
—  
truck  
car



# Względność interwałów czasowych



W spoczynku:  $\Delta t_0 = 2d/c$

# Interwał $\Delta t$

$$l = \sqrt{d^2 + \left(\frac{u\Delta t}{2}\right)^2}$$

$$\Delta t = \frac{2l}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{d^2 + \left(\frac{u\Delta t}{2}\right)^2}$$

$$\Delta t = \frac{2}{c} \sqrt{\left(\frac{c\Delta t_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{u\Delta t}{2}\right)^2}$$

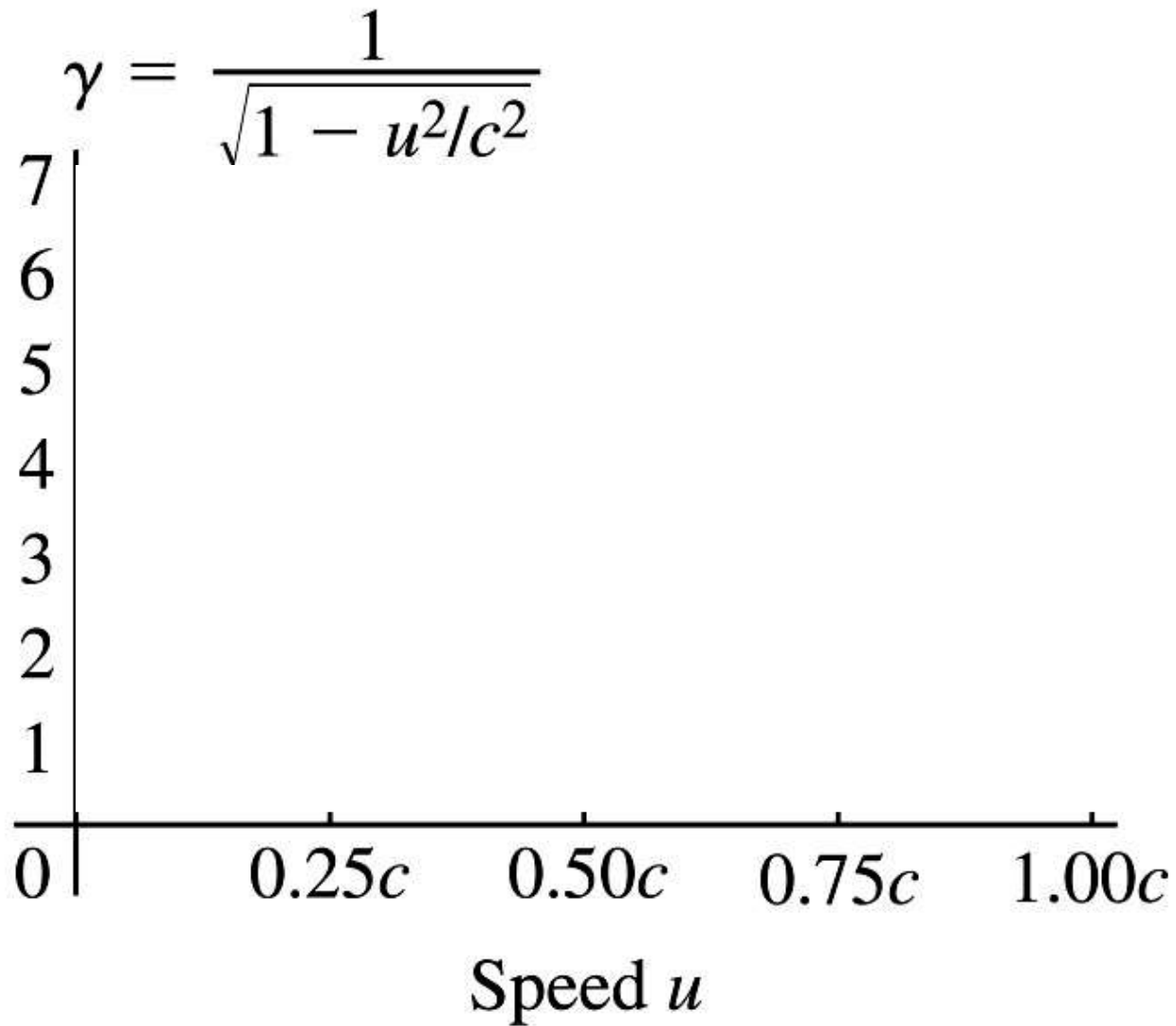
$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

# Dylatacja czasu

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$$

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0$$

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



# Przykład: miony

Wysokoenergetyczne cząstki z kosmosu oddziałują z atomami w górnych partiach atmosfery produkując wysoko niestabilne cząstki nazywane mionami.

Miony mają czas życia równy  $2.2 \times 10^{-6} \text{s}$  w układzie odniesienia związanym z nimi.

Jeśli miony poruszają się z prędkością  $0.99c$  względem ziemi, to jaki czas ich życia zarejestrujemy?

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - u^2 / c^2}} = \frac{2.2 \times 10^{-6} \text{ s}}{\sqrt{1 - (0.99)^2}}$$
$$= 15.6 \times 10^{-6} \text{ s}$$

## Przykład 2

Jedziemy na spotkanie biznesowe z prędkością 30 m/s. Szef spodziewa się, że podróż zajmie nam 5 godzin. Kiedy przyjeżdżamy spóźnieni, tłumaczymy się, że zegarek w samochodzie pokazuje dokładnie 5 godzin podróży, ale ponieważ jechaliśmy bardzo szybko, to zegarek w samochodzie chodził wolniej niż zegarek szefa. Zatem skoro zegarek w samochodzie pokazuje, że podróż trwała 5 godzin, to ile czasu minęło na zegarku szefa?

B

A



$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\left(3 \times 10^1 \frac{m}{s}\right)^2}{\left(3 \times 10^8 \frac{m}{s}\right)^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 10^{-14}}}$$

Aby wyrazić to bardziej precyzyjniej użyjmy rozwinięcia w szereg.

$$\gamma = (1 - 10^{-14})^{-\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{1}{2} (10^{-14}) = 1 + 5 \times 10^{-15}$$

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' = (1 + 5 \times 10^{-15}) \cdot 5h = 5h + 2,5 \times 10^{-14}h$$

$$\Delta t = 5h + 0,09ns$$

... zatem zegarek szefa będzie śpieszył się tylko o 0,09 ns w stosunku do czasu na zegarze w samochodzie.



# Dylatacja czasu

Jest zjawiskiem, które zostało zweryfikowane i potwierdzone eksperymentalnie przez Hafele i Keatinga

## Październik 1971

- 4 bardzo dokładne zegary cezowe na pokładzie odrzutowca pasażerskiego latającego wokół ziemi.
- eksperyment był wykonany dwukrotnie – w podróży na wschód i na zachód,
- wyniki były porównywane z zegarem atomowym w U.S. Naval Observatory.
- w trakcie podróży na wschód – opóźnienie o  $59 \pm 10$  ns
- w trakcie podróży na zachód – przyśpieszenie o  $273 \pm 7$  ns



# Paradoks bliźniąt

Bliźniaki – 20 lat

Prędkość statku =  $0,95 c$



Po podróży:

- Speedo miał 33 lata (o 13 lat starszy)
- Goslo miał 62 lata

Kto jest podróżnikiem i kto powinien być starszy?



# Paradoks bliźniąt

Według Goslo:

Podróż trwała:

$$t_G = \frac{L}{0,95c} = \frac{40 \text{ yrs} \cdot c}{0,95 c} = 42,1 \text{ yrs}$$

Czas na statku:

$$t_s = t_G \sqrt{1 - (0,95c)^2} = 13,1 \text{ yrs}$$

Układ odniesienia związany ze statkiem nie jest inercjalny



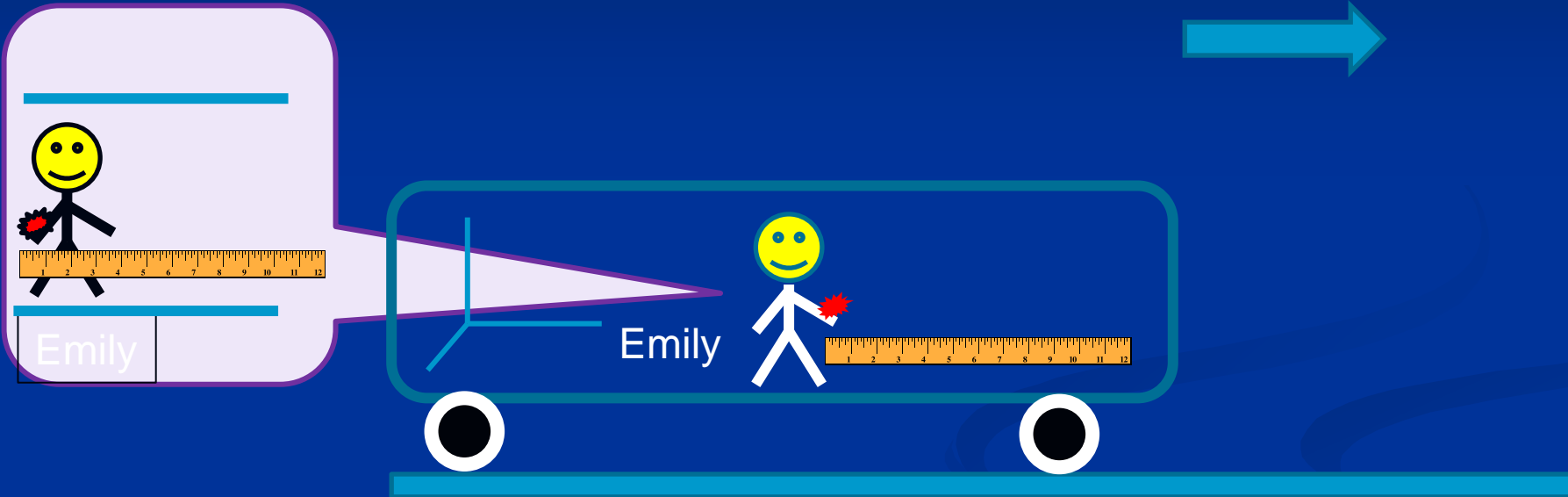
Szczególna teoria względności nie może być wykorzystana w uzasadnieniu Speedo.



# Kontrakcja długości

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} = \frac{l_0}{\gamma}$$

u



For Emily light pulse travels the distance  $l_0$  (length of the ruler)



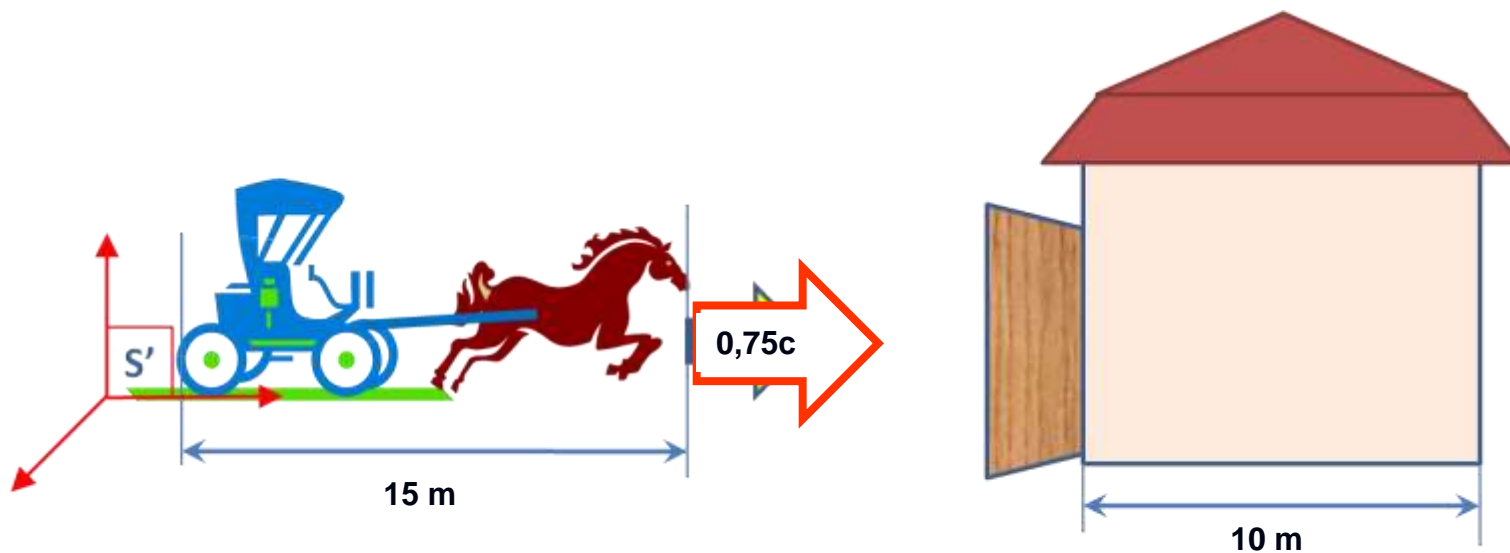
For David ruler moves with relative speed  $u$ , so the light pulse will travel the distance of the ruler and additional distance  $u\Delta t_1$

# Przykład

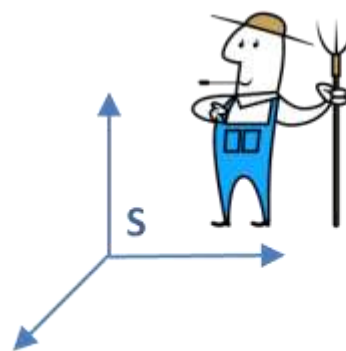
Statek kosmiczny przelatuje w pobliżu ziemi z prędkością  $0.99c$ . Załoga statku zmierzyła długość statku otrzymując wynik  $400m$ . Jaką długość zmierzy obserwator na ziemi?

$$\begin{aligned}l &= l_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \\ &= (400m) \sqrt{1 - (0.99)^2} \\ &= 56.4m\end{aligned}$$

# Koń w stodole – kolejny paradoks

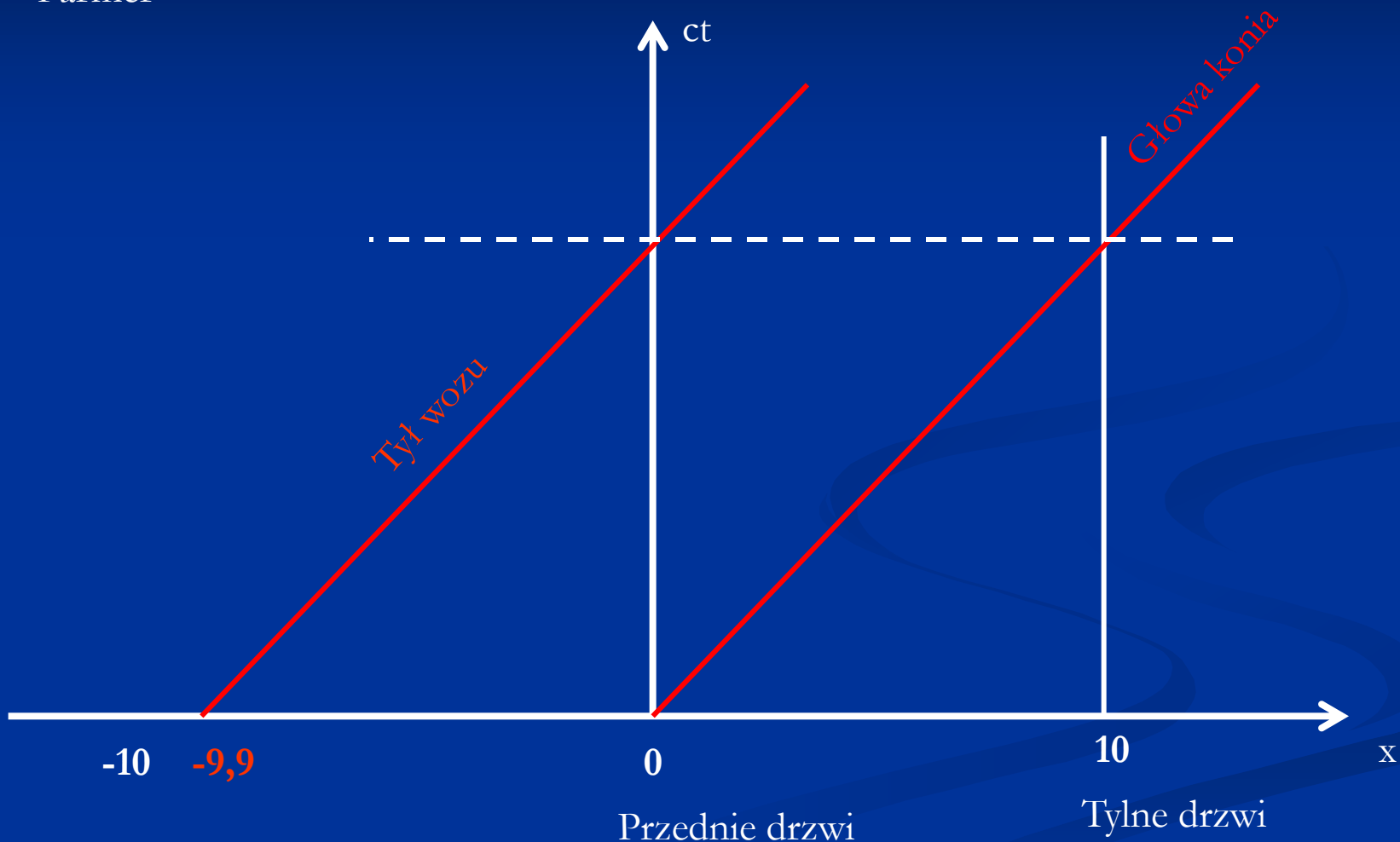


Farmer może zamknąć i otworzyć drzwi w jednej chwili.

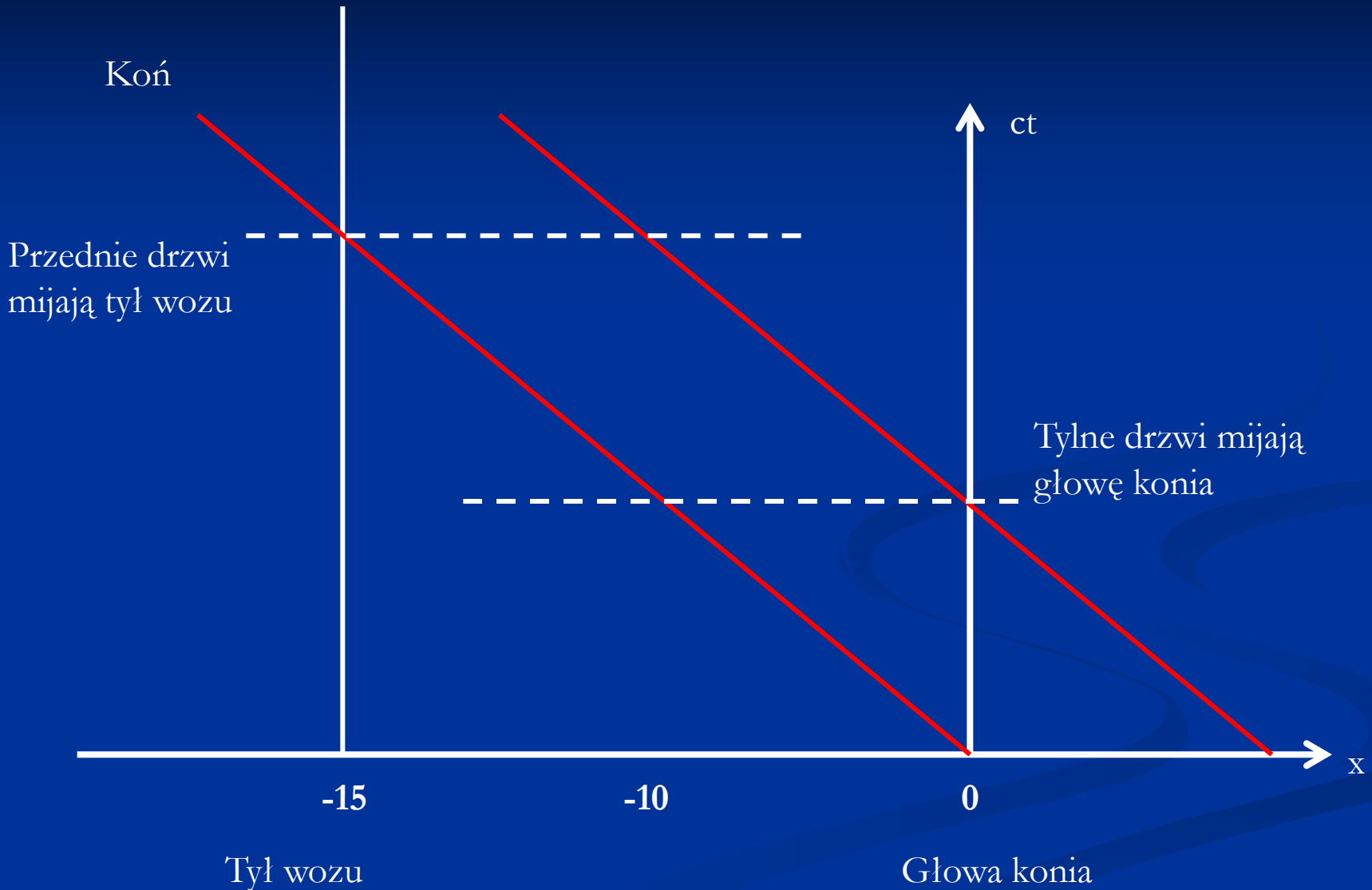


# Koń w stodole – kolejny paradoks

Farmer



# Koń w stodole – kolejny paradoks





**Długość własna** – jest mierzona przez obserwatora dla którego punkty końcowe długości są stałe w przestrzeni.

**Czas własny** – jest mierzony przez obserwatora, dla którego dwa zdarzenia mają miejsce w tym samym miejscu w przestrzeni.

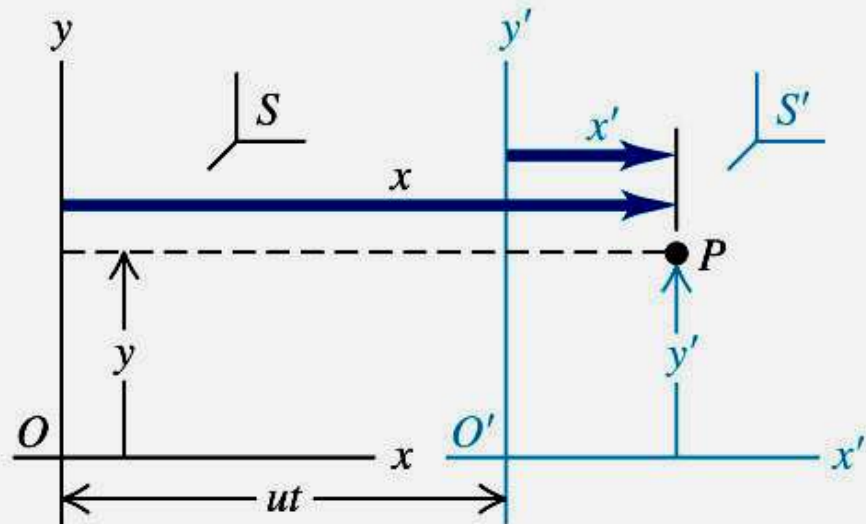
W eksperymencie z mionami:

- w układzie związanym z mionami mierzymy czas własny.
- w układzie obserwatora na ziemi mierzona jest długość własna.

# Transformacja Lorentza

Frame  $S'$  moves relative to frame  $S$  with constant velocity  $u$  along the common  $x$ - $x'$  axis

Origins  $O$  and  $O'$  coincide at time  $t = 0 = t'$



## Transformacja Lorentza dla współrzędnych i czasu

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} = \gamma(x - ut)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} = \gamma(t - ux/c^2)$$

## Transformacja Lorentza dla prędkości

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - uv_x/c^2}$$

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

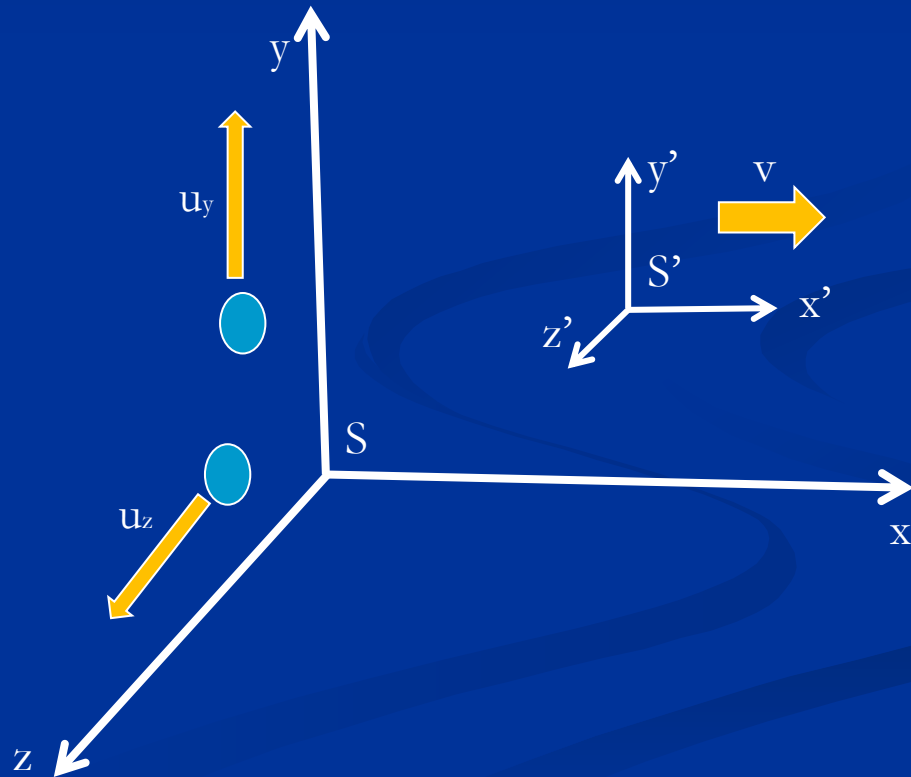
# Transformacja Lorentza dla prędkości dla różnych kierunków ruchu

Dla ruchów w kierunkach prostopadłych do siebie transformacja prędkości ma inny wzór:

Obserwator w układzie odniesienia  $S'$  zarejestruje prędkość :

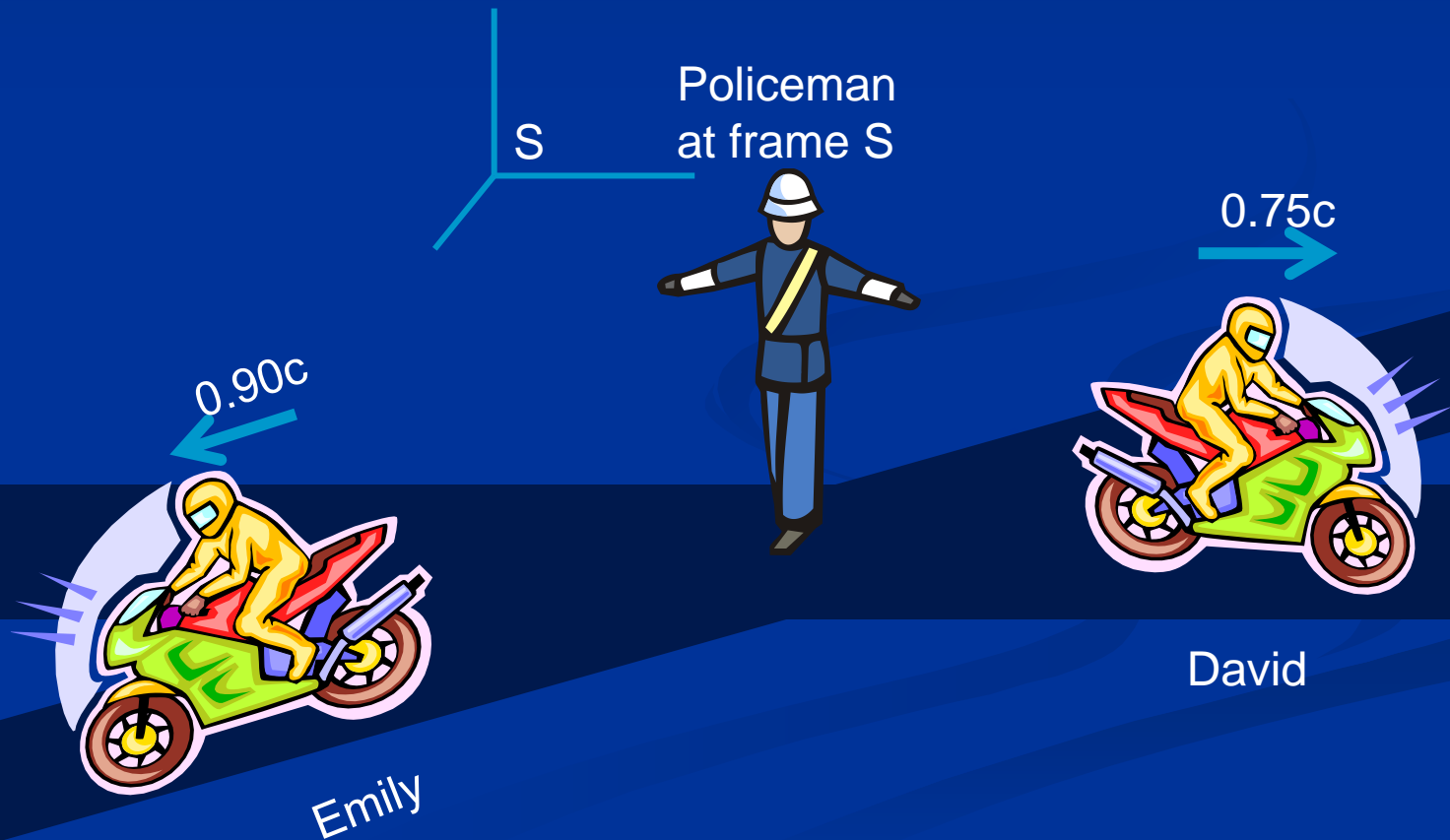
$$u'_y = \frac{u_y}{\gamma \left(1 - \frac{u_x v}{c^2}\right)}$$

$$u'_z = \frac{u_z}{\gamma \left(1 - \frac{u_x v}{c^2}\right)}$$



# Transformacja Lorentza dla prędkości dla różnych kierunków ruchu

Członkowie dwóch gangów motocyklowych ruszają ze skrzyżowania w dwóch prostopadłych kierunkach. Z jaką prędkością oddala się Emily od Davida w jego układzie odniesienia?



# Transformacja Lorentza dla prędkości dla różnych kierunków ruchu

David:  $u_x = 0.75c$      $u_y = 0$

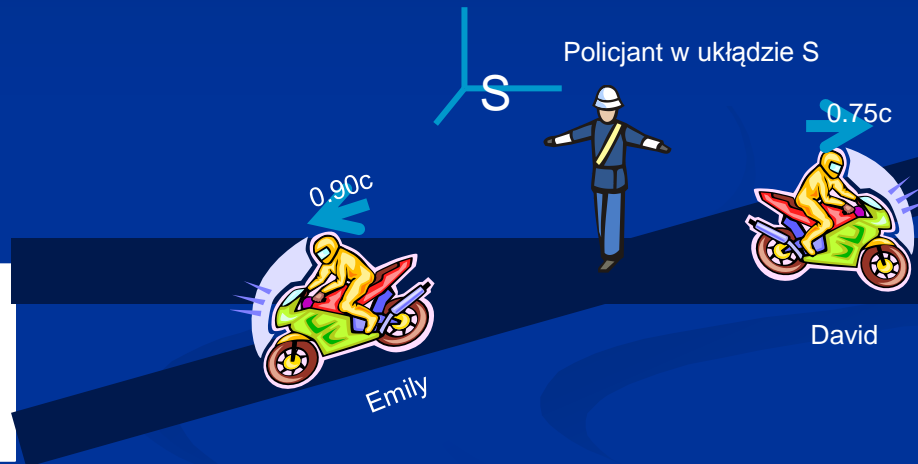
Emily:  $u_x = 0$      $u_y = -0.90c$

Przyjmujemy układ S' związany z Davidem i w nim obliczamy prędkość Emily.

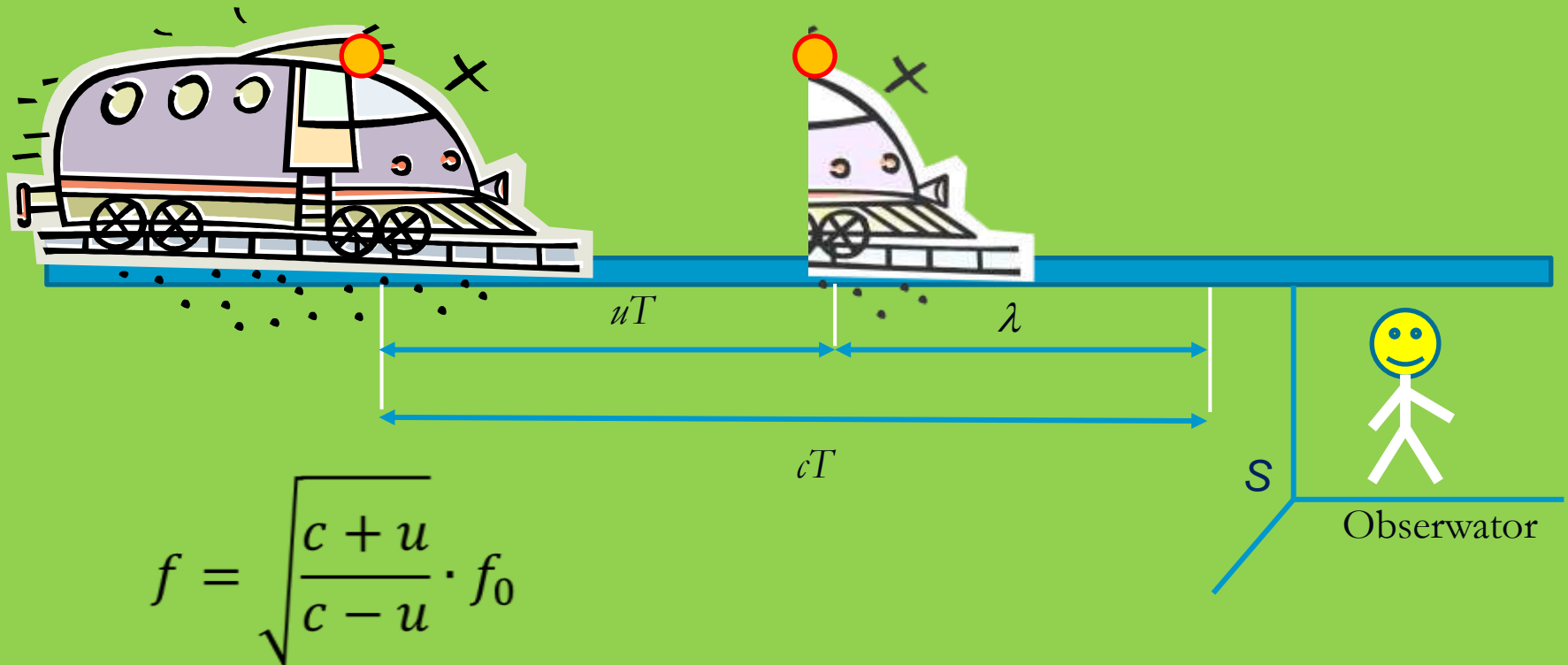
$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}} = \frac{0 - 0,75c}{1 - \frac{0 \cdot 0,75c}{c^2}} = -0,75c$$

$$u'_y = \frac{u_y}{\gamma \left(1 - \frac{u_x v}{c^2}\right)} = \frac{\sqrt{1 - \frac{(0,75c)^2}{c^2}} \cdot (-0,90c)}{\left(1 - \frac{0 \cdot 0,75c}{c^2}\right)} = -0,60c$$

$$u' = \sqrt{(u'_x)^2 + (u'_y)^2} = \sqrt{(-0,75c)^2 + (-0,60c)^2} = 0,96c$$



# Efekt Dopplera dla fal elektromagnetycznych



# Pęd relatywistyczny

- Wnioski płynące z postulatów Einsteina mówią, że prawa fizyki muszą być zweryfikowane
- Aby opisać prawidłowo ruch cząstek relatywistycznych:

**Transformacja Galileusza**

zastąpić

**Transformacja Lorentza**

Prawa fizyki muszą pozostać niezmiennicze względem transformacji Lorentza

- Prawa dynamiki Newtona
- Pęd
- Energia

Muszą być zmodyfikowane aby dostosować się do transformacji Lorentza.

Relatywistyczna definicja pędu powinna sprowadzać się do klasycznej, nierelatywistycznej definicji pędu dla prędkości  $v \ll c$



# Pęd relatywistyczny

## Zasada zachowania pędu:

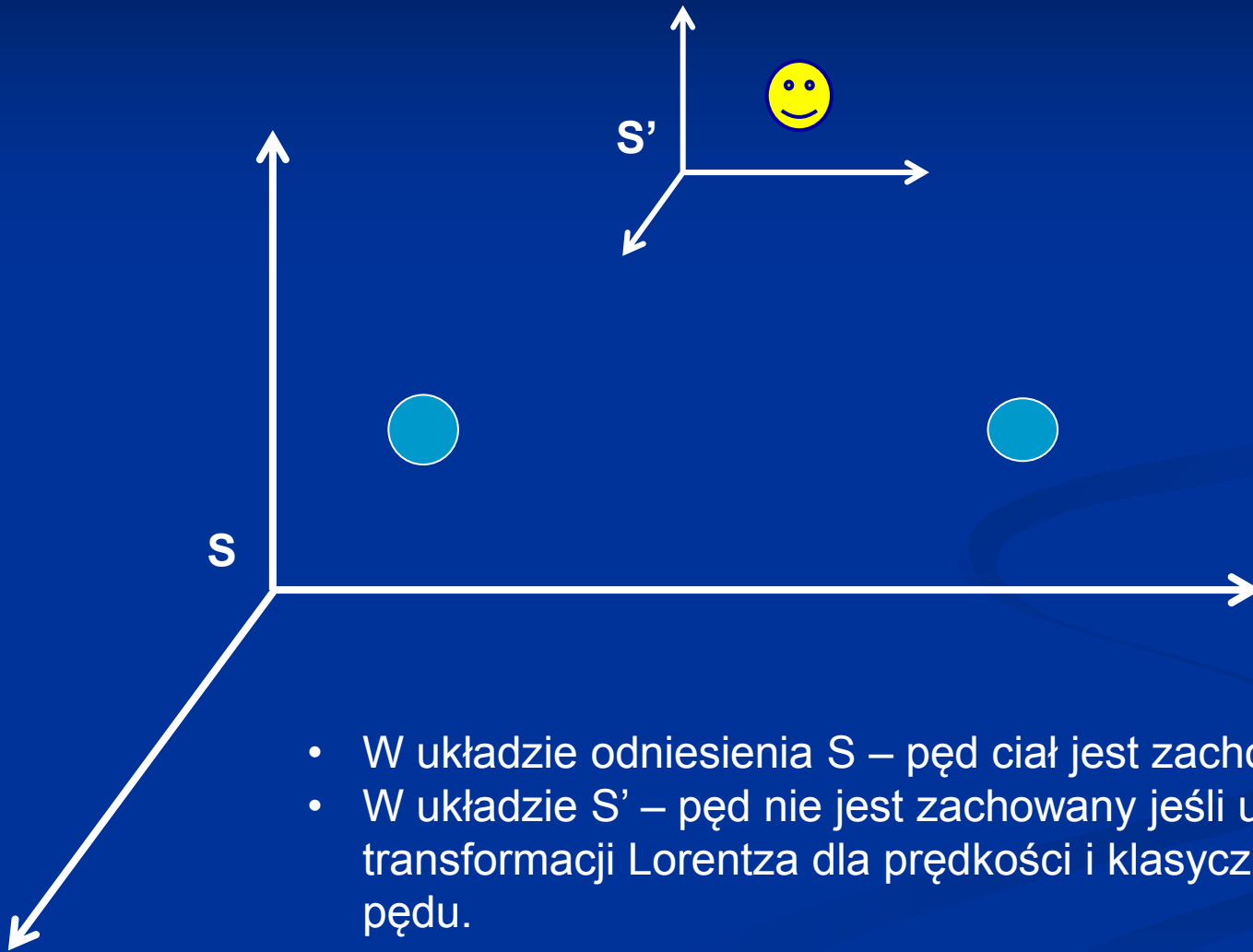
W trakcie zderzenia dwóch obiektów ich pęd całkowity w układzie izolowanym pozostaje niezmienny.

lub

Przy braku zewnętrznych sił działających na układ, pęd całkowity oddziałujących ze sobą cząstek jest stały.

$$\sum_i p_i = \vec{P} = \text{const}$$

# Pęd relatywistyczny



- W układzie odniesienia  $S$  – pęd ciała jest zachowany,
- W układzie  $S'$  – pęd nie jest zachowany jeśli użyjemy transformacji Lorentza dla prędkości i klasycznej definicji pędu.

# Pęd relatywistyczny

Prawa fizyki muszą być takie same we wszystkich inercjalnych układach odniesienia

+

Transformacja Lorentza jest prawidłowa



Definicja pędu musi być zmodyfikowana

$$\vec{p} = m \cdot f(v) \cdot \vec{v}$$

- $f(v) = 1$  dla  $v \rightarrow 0$
- $f(v)$  musi być funkcją  $v^2$
- $f(v)$  musi być bezwymiarowe

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\vec{p} = m \cdot \gamma \cdot \vec{v} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# Pęd elektronu

Elektron o masie  $9 \times 10^{-31}$  kg porusza się z prędkością  $0,75c$ .

Jaki jest pęd relatywistyczny tego elektronu? Wynik porównać z wynikiem obliczonym z klasycznej definicji pędu.

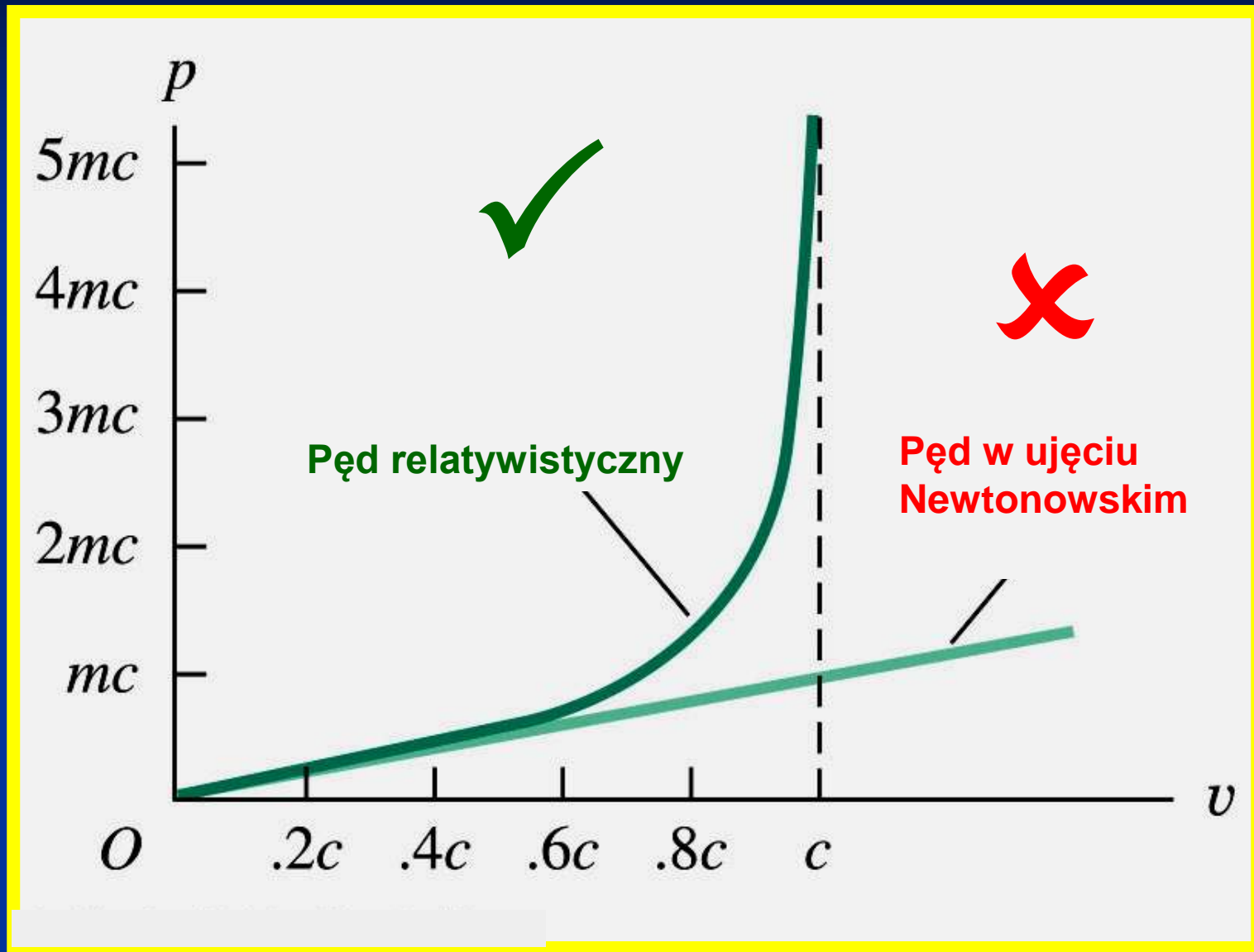
$$p = \frac{m_e v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{(9,11 \times 10^{-31}) \cdot 0,75 \cdot (3 \times 10^8)}{\sqrt{1 - \frac{(0,75c)^2}{c^2}}} = 3 \times 10^{-22} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Z klasycznej definicji:

$$p = m_e v = 2,05 \times 10^{-22} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Zatem prawidłowy wynik (relatywistyczny) jest 50% większy niż wynik z klasycznej definicji pędu.

# Pęd relatywistyczny



# Relatywistyczna forma II zasady Newtona

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

Przyśpieszenie ciała w ujęciu relatywistycznym maleje pod wpływem stałej siły  $F$

$$a \propto \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}}$$

Wraz ze zbliżaniem się prędkości do  $c$ , przyśpieszenie wywołane dowolną skończoną siłą zmierza do zera.




Niemożliwe jest przyśpieszenie ciała od stanu spoczynku do prędkości  $v > c$

# Praca i energia w ujęciu relatywistycznym

Aby uczynić je zgodnymi z postulatami Einsteina, definicja energii kinetycznej musi być zmodyfikowana.

Rozpatrzmy cząstkę poruszającą się wzdłuż osi  $x$



The diagram shows a 2D coordinate system with a vertical y-axis and a horizontal x-axis. A yellow star-shaped particle is positioned at a point on the x-axis labeled  $x_1$ . A vertical dashed line extends from  $x_1$  on the x-axis up to the particle. Another vertical dashed line is drawn at a point on the x-axis labeled  $x_2$ , to the right of  $x_1$ . The x-axis is labeled with  $x$  at its right end.

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dp}{dt} dx$$

# Praca i energia w ujęciu relatywistycznym

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

Podstawiając to wyrażenie i  $dx = v dt$

$$W = \int_0^t \frac{m \left( \frac{dv}{dt} \right) v dt}{\left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}} = m \int_0^v \frac{v}{\left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}} dv$$

Zmieniamy zmienną całkowania oraz granice.

Obliczając całkę dostajemy:

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

Zgodnie z teorią  
o pracy i energii

=  $K$

Relatywistyczna  
Energia  
Kinetyczna



# Praca i energia w ujęciu relatywistycznym

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 = \gamma mc^2 - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2$$

Wzór ten został potwierdzony eksperymentalnie za pomocą akceleratorów cząstek wysokoenergetycznych.

Praca wykonana nad przyśpieszeniem cząstki o masie  $m$  ze stanu spoczynku do prędkości  $v$  równa jest jej relatywistycznej energii kinetycznej.

Rozwijając w szereg wyrażenie na  $\gamma$   $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}$  dla  $v \ll c$

$$K = \left[ \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) - 1 \right] mc^2 = \frac{mv^2}{2}$$

Klasyczna forma wyrażenia na energię kinetyczną.

# Praca i energia w ujęciu relatywistycznym

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

$$E_R = mc^2$$

Energia spoczynkowa

Całkowita energia = Energia kinetyczna + Energia spoczynkowa

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

- Masa jest formą energii,
- małą masę odpowiada ogromnej ilości energii, koncept podstawowy dla fizyki cząstek elementarnych.

# Praca i energia w ujęciu relatywistycznym

Zamiast mierzyć prędkość cząstki lepiej jest mierzyć jej pęd lub energię.

$$E = \gamma mc^2$$

$$p = \gamma mc$$

Eliminując  $v$

$$E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2$$

Kiedy pęd cząstki  $p=0$ , wtedy

$$E = E_R = mc^2$$

Foton :  $m=0$

$$E = pc$$

# Praca i energia w ujęciu relatywistycznym

Foton :  $m=0$

$$E = pc$$

Wyrażenie wiążące ze sobą energię całkowitą z pędem fotonu

**Niezmienniczość masy** – masa jest niezależna od ruchu i pozostaje stałą we wszystkich układach inercjalnych.

...ale **energia całkowita** i **pęd** zależą od prędkości, zatem ich wartości zależą od układów odniesienia, w których są mierzone.

# Praca i energia w ujęciu relatywistycznym

Elektronowolt

$$1eV = 1,60 \times 10^{-19}J$$

Energia przekazana cząstce przy przyspieszeniu jej przez różnicę potencjałów.

Elektron

$$m_e = 9,11 \times 10^{-31}kg$$

Masa spoczynkowa elektronu

$$m_e c^2 = 9,11 \times 10^{-31} \cdot 3 \times 10^8 = 8,2 \times 10^{-14}J$$
$$8,20 \times 10^{-14}J \cdot \frac{1 eV}{1,60 \times 10^{-19}J} = 0,511 MeV$$

# Praca i energia w ujęciu relatywistycznym

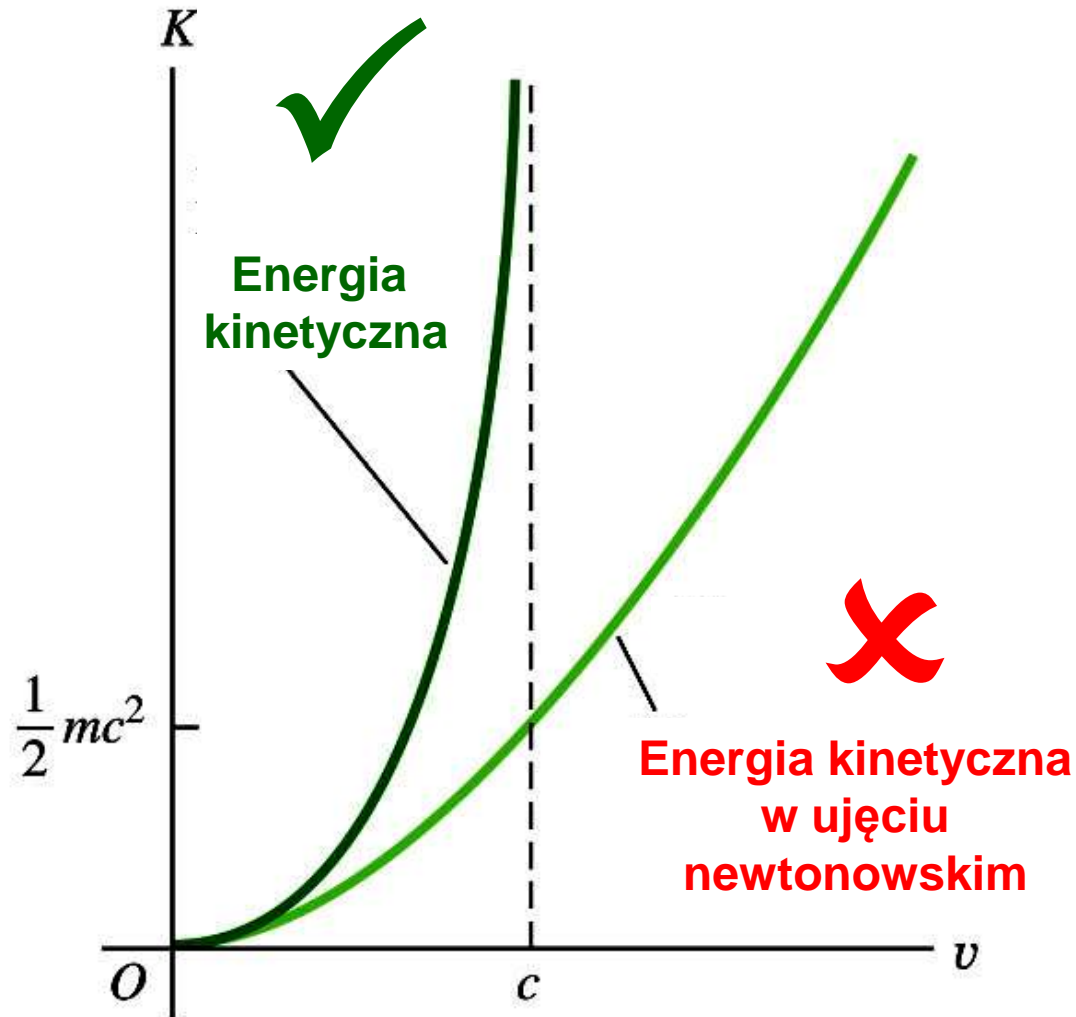
Elektronu w kineskopie telewizora porusza się z prędkością  $0,25c$   
Znaleźć energię całkowitą i kinetyczną w elektronowoltach.

$$E = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{0,511 \text{ MeV}}{\sqrt{1 - \frac{(0,25c)^2}{c^2}}} = 0,528 \text{ MeV}$$

Wynik większy o 3% w stosunku do energii spoczynkowej.

$$K = E - m_e c^2 = 0,528 \text{ MeV} - 0,511 \text{ MeV} \\ = 0,017 \text{ MeV}$$

# 37.8 Relativistic Work and Energy



# Relatywistyczna energia kinetyczna

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2$$

Energia całkowita, energia spoczynkowa, pęd

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

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$



# Ogólna teoria względności

Masa posiada dwie różne właściwości:

- Właściwość grawitacyjna (siła przyciągania między dwiema masami)
- Właściwość inercjalna (opór pojedynczej masy do bycia przyśpieszoną)

Masa grawitacyjna i masa inercjalna są równoważne

- 1911 Albert Einstein, Ogólna teoria względności,
- Opisuje względność w nieinercjalnych układach odniesienia,
- Podwójna natura masy jest dowodem na istnienie relacji między tymi dwoma zachowaniami,

$$F_g = m_g g$$

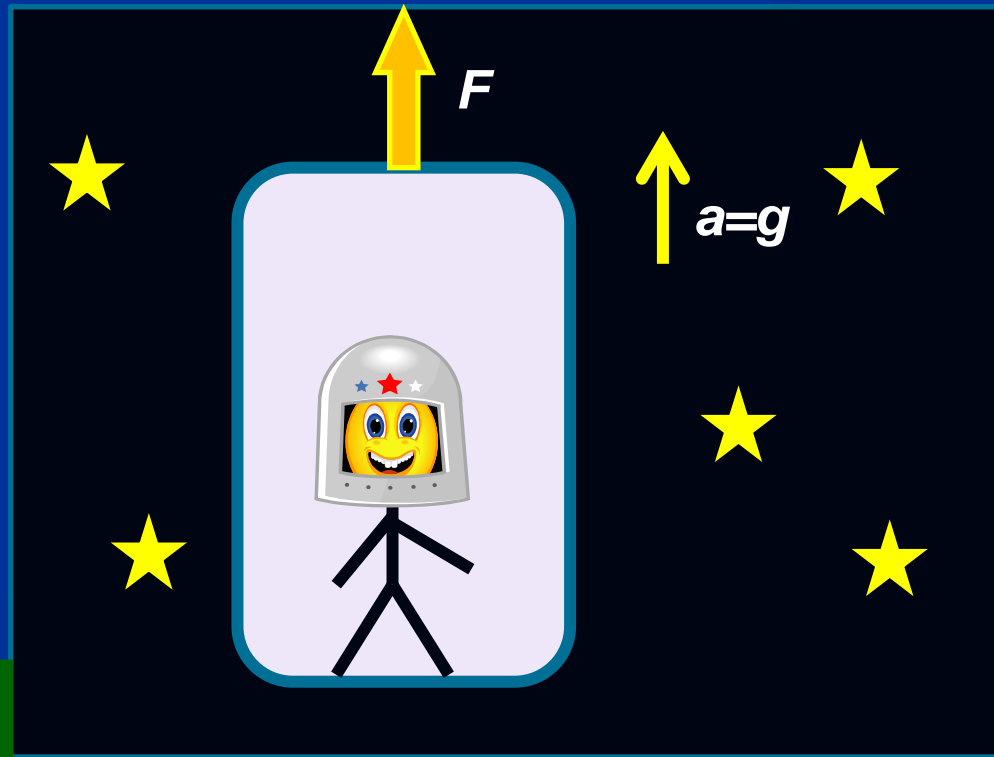
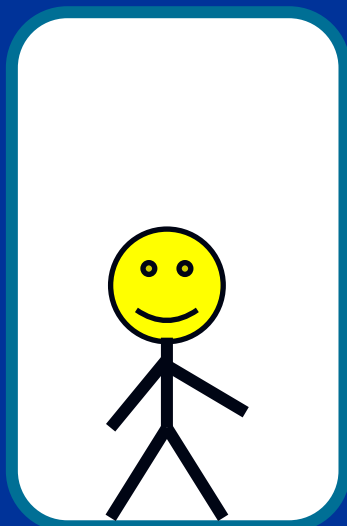
$$\sum F = m_i a$$

# Ogólna teoria względności

Żaden mechaniczny eksperyment nie pozwala rozróżnić następujące dwie sytuacje:

- Obserwator na Ziemi odczuwa wpływ przyciągania grawitacyjnego (inercjalny układ odniesienia),
- Obserwator w kosmosie odczuwa również taką samą siłę (nieinercjalny układ odniesienia),

**Według teorii Einsteina, obydwie sytuacje są równoważne.**

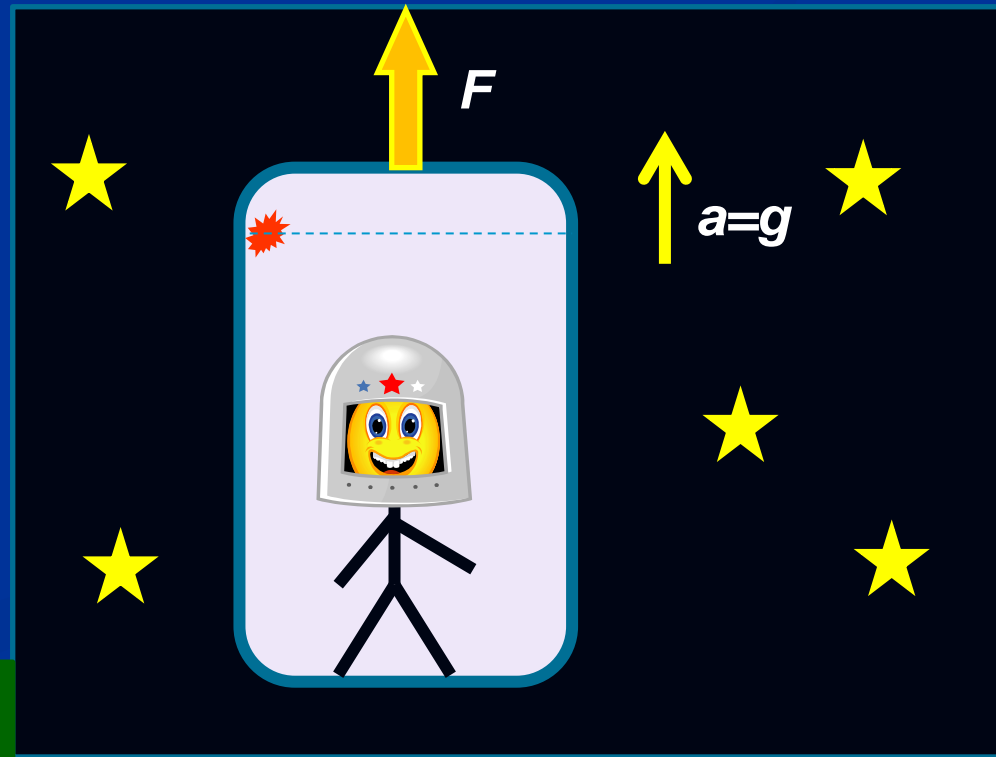
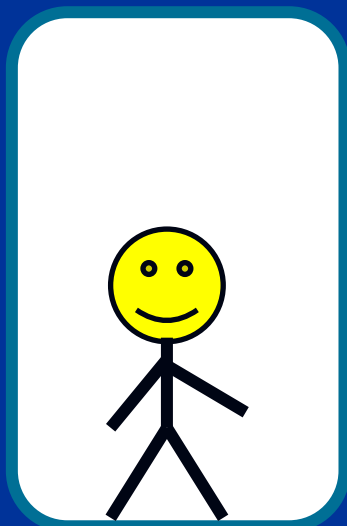


# Ogólna teoria względności

Einstein rozszerzył tą ideę na niemechaniczne przypadki:

- Dla obserwatora na zewnątrz windy światło podróżuje na wprost kiedy winda przyspiesza w górę,
- Dla obserwatora wewnątrz windy trajektoria światła zagina się w dół kiedy winda przyspiesza do góry.

Na podstawie zasady równoważności światło powinno być zaginane w dół przez pole grawitacyjne.



# Ogólna teoria względności

## Postulaty Einsteina w ogólnej teorii względności

- Wszystkie prawa natury mają tę samą formę dla obserwatorów w każdym układzie odniesienia, zarówno inercyjnym jak i nieinercyjnym.
- W pobliżu każdego punktu, pole grawitacyjne jest równoważne przyśpieszającemu układowi odniesienia poza wpływem pola grawitacyjnego.  
(Zasada równoważności)

### Interesujące efekty:

- Czas jest zmieniany przez grawitację,
- Zegary chodzą wolniej w obecności pola grawitacyjnego,
- Częstotliwości promieniowania emitowanego przez atomy przesuwają się w kierunku częstotliwości krótszych (red-shift) w obecności silnej grawitacji.  
(potwierdzone eksperymentalnie).

# General theory of relativity

## Second Einstein's postulate in general theory of relativity

- W pobliżu każdego punktu, pole grawitacyjne jest równoważne przyspieszającemu układowi odniesienia poza wpływem pola grawitacyjnego.  
(Zasada równoważności)
  - Sugeruje to, że pole grawitacyjne może być „przetransformowane” jeśli wybierzemy odpowiedni nieinercjalny układ odniesienia.

**Zaginanie czasoprzestrzeni** – innowacyjny koncept opisu wpływu pola grawitacyjnego na każdy punkt przestrzeni – opis przyspieszenia aby uczynić pole grawitacyjne niewidocznym

- Zastępuje Newtonowską teorię grawitacji,
- Pole grawitacyjne nie istnieje...
- ... raczej obecność masy która powoduje zaginanie czasoprzestrzeni w pobliżu tej masy.
- Zaginanie czasoprzestrzeni dyktuje ścieżkę czasoprzestrzenną którą podążać mają wszystkie obiekty.

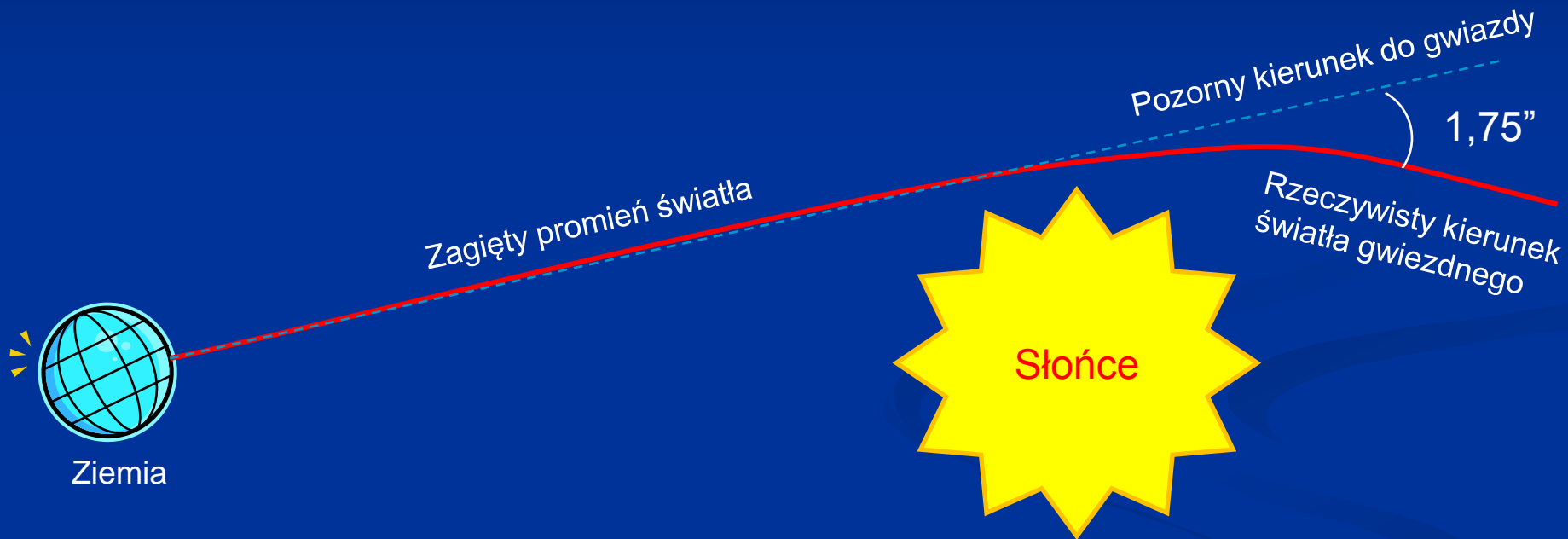
# General theory of relativity

## *Zaginienie czasoprzestrzeni* – przykład

- Dwóch podróżników idzie równolegle do siebie w kierunku północnym w odstępie kilku metrów od siebie. Two travelers walks northward along parallel paths apart few meters,
- Obserwując siebie na równiku stwierdzają, że ich ścieżki są równoległe,
- Zbliżając się do bieguna północnego ich ścieżki się spotkają.
- Wędrują równolegle do siebie, ale zbliżają się do siebie zupełnie jakby istniała jakaś siła przyciągająca między nimi.
- Ich wnioski bazują na codziennym odczuciu...
- ... ale w rzeczywistości poruszają się po zagiętej przestrzeni.
- **W podobny sposób ogólna teoria względności zastępuje pojęcie siły z ruchem ciał przez zagiętą czasoprzestrzeń.**

# Ogólna teoria względności

## Zagięcie światła w pobliżu Słońca.



Wiązka świetlna w pobliżu Słońca będzie ugięta w zakrzywieniu czasoprzestrzennym spowodowanym masą Słońca. (potwierdzone eksperymentalnie)

# Ogólna teoria względności

***„Przestrzeń mówi materii jak się poruszać  
zaś materia mówi przestrzeni jak ma się zaginać”***

John Wheeler, 1979

To zdanie podsumowuje ogólną teorię względności



# Podsumowanie

Wszystkie podstawowe prawa fizyki mają tą samą formę we wszystkich układach inercjalnych. Prędkość światła w próżni jest taka sama we wszystkich układach inercjalnych i jest niezależna od ruchu źródła. Jednoczesność nie jest pojęciem absolutnym: zdarzenia w jednym układzie odniesienia nie są jednoczesne w drugim układzie poruszającym się względem pierwszego.

# Podsumowanie

Jeśli dwa zjawiska występują w tym samym punkcie w przestrzeni, to czas między nimi  $\Delta t_0$  mierzony w tym układzie zwany jest czasem własnym. Jeśli ten układ porusza się ze stałą prędkością  $u$  względem drugiego układu, to czas między tymi zdarzeniami  $\Delta t$  mierzony w tym drugim układzie będzie dłuższy niż  $\Delta t_0$ .  
Efekt ten znany jest jako dylatacja czasu.

# Summary

Jeśli dwa punkty są w spoczynku w pewnym układzie odniesienia, dystans  $l_0$  między nimi nazywany jest długością własną. Jeśli ten układ odniesienia porusza się z prędkością  $u$  względem drugiego układu odniesienia, dystans  $l$  między tymi punktami jest krótsza niż  $l_0$ . Efekt ten nazywany jest skróceniem Lorentzowskim, lub kontrakcją długości.

# Podsumowanie

Transformacja Lorentza wyraża współrzędne przestrzenne i czasowe jednego układu inercjalnego we współrzędnych drugiego układu odniesienia poruszającego się z prędkością  $u$  względem pierwszego. Również prędkość obiektu w jednym układzie odniesienia może być wyrażone przez prędkość w drugim układzie odniesienia.

# Podsumowanie

Efekt Dopplera jest zjawiskiem zmiany częstotliwości fali elektromagnetycznej pochodzącej ze źródła z powodu ruchu względnego między źródłem a obserwatorem. Zdefiniowane jest to następującą zależnością:

$$f = \sqrt{\frac{c + u}{c - u}} \cdot f_0$$

# Podsumowanie

Szczególna teoria względności jest uogólnieniem mechaniki Newtonowskiej. Wszystkie podstawy mechaniki Newtonowskiej istnieją jako ograniczonej w swojej postaci gdzie wszystkie prędkości są dużo mniejsze od  $c$ .

Dalsze uogólnienie obejmuje sobą nieinercjalne układy odniesienia oraz ich związek z polem grawitacyjnym.

Koniec