

Kinematyka relatywistyczna

Fizyka I (B+C)

Wykład V:

- Prędkość światła
 - ⇒ historia pomiarów
 - ⇒ doświadczenie Michelsona-Morleya
 - ⇒ prędkość graniczna
- Teoria względności Einsteina
- Dylatacja czasu

Prędkość światła

Prędkość można wyznaczyć na dwa sposoby

- zmierzyć czas potrzebny na pokonanie znanej odległości
- zmierzyć odległość pokonywaną w wyznaczonym czasie

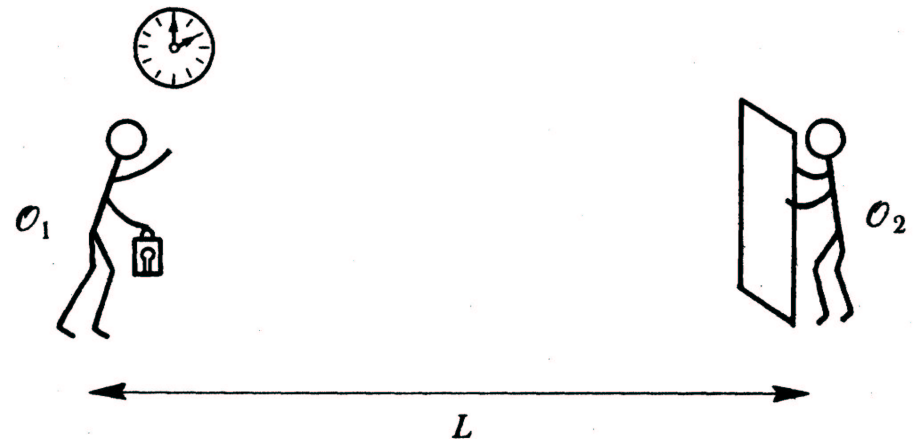
w przypadku prędkości światła praktyczna jest tylko pierwsza metoda

Galileusz

Jako pierwszy zaproponował pomiar prędkości światła metodą czasu przelotu.

Jednak przy ówczesnych dokładnościach pomiarów ($\Delta L \sim 1 \text{ m}$, $\Delta t \sim 1 \text{ s}$) było to niewykonalne...

Nie w warunkach ziemskich...



Prędkość światła

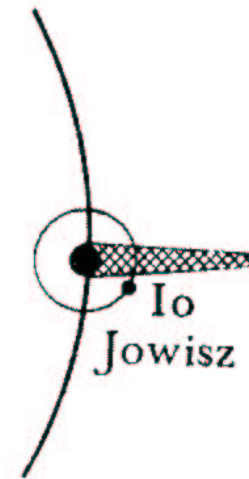
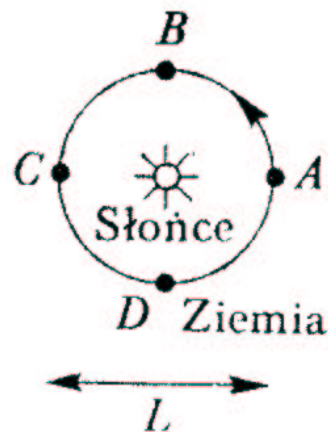
Pomiar Roemera

1676

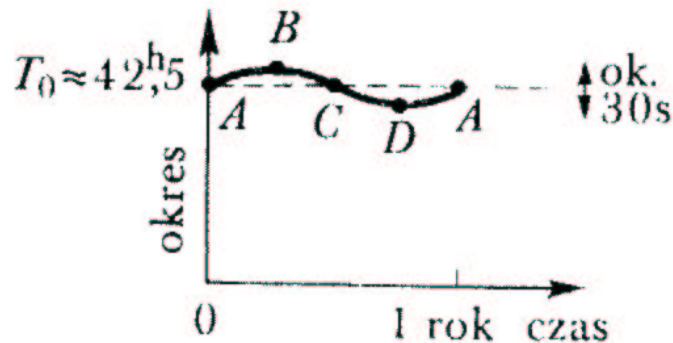
obserwowany na Ziemi czas zaćmienia satelity Io zależy od odległości do Ziemi
⇒ prędkość światła jest skończona

Na odległości równej średnicy orbity Ziemi (~300 mln km) opóźnienie wyniosło $16^m 37^s.8$ (~1000 s).

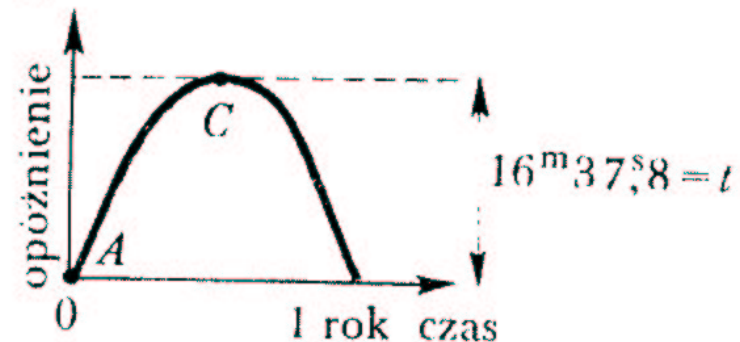
a)



b)



c)



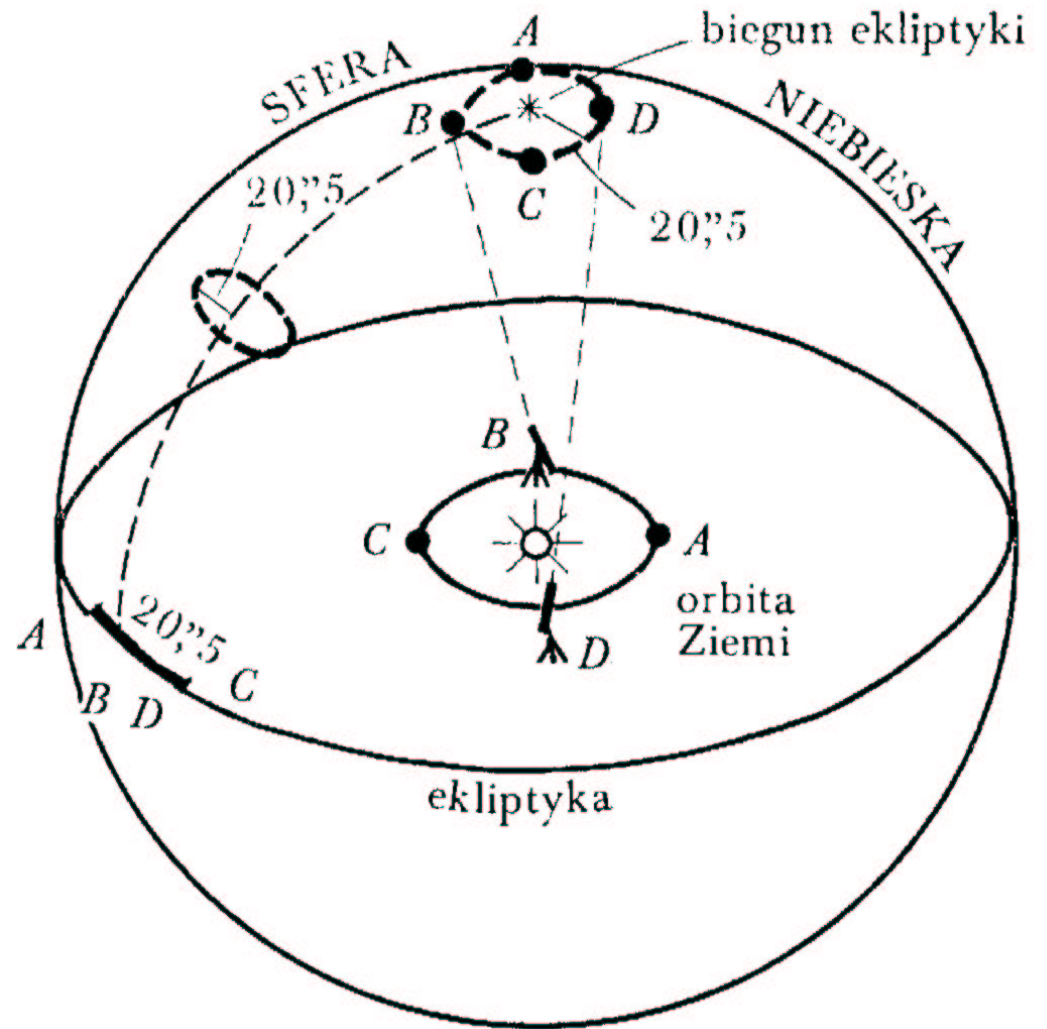
Prędkość światła

Abberacja światła gwiazd

pozorny ruch położenia kąowego
odległych gwiazd

William Bradley (1727)

gwiazdy zmieniają w ciągu roku swoje
położenie na sferze niebieskiej o ok.
20.5 sekundy łuku

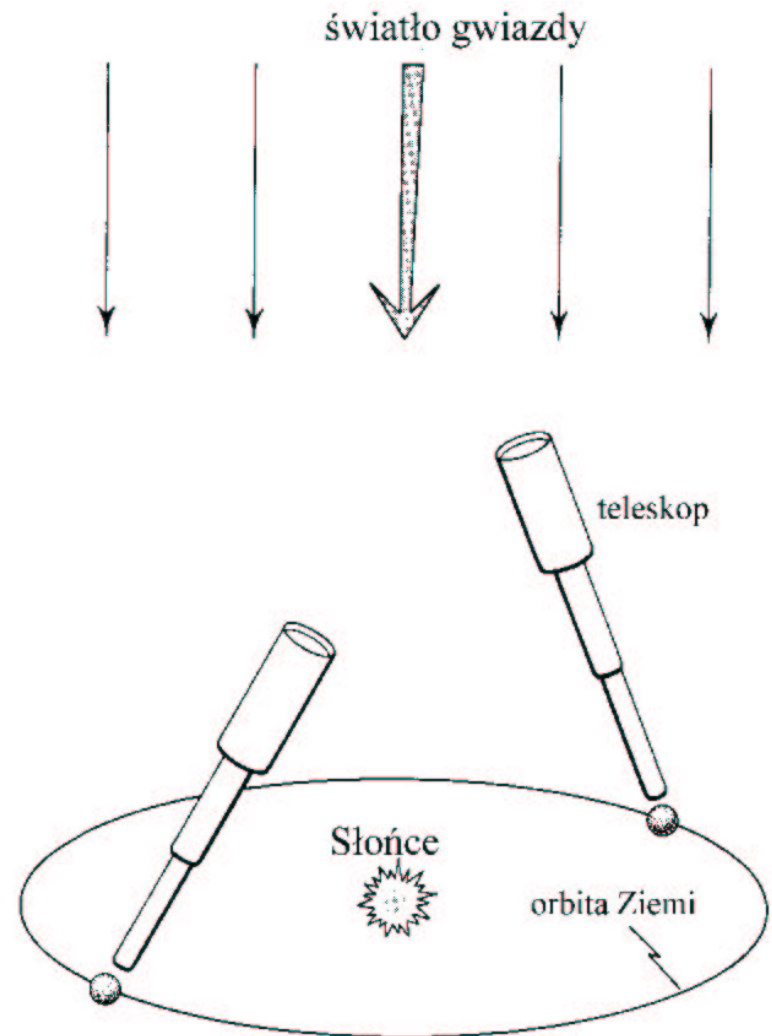
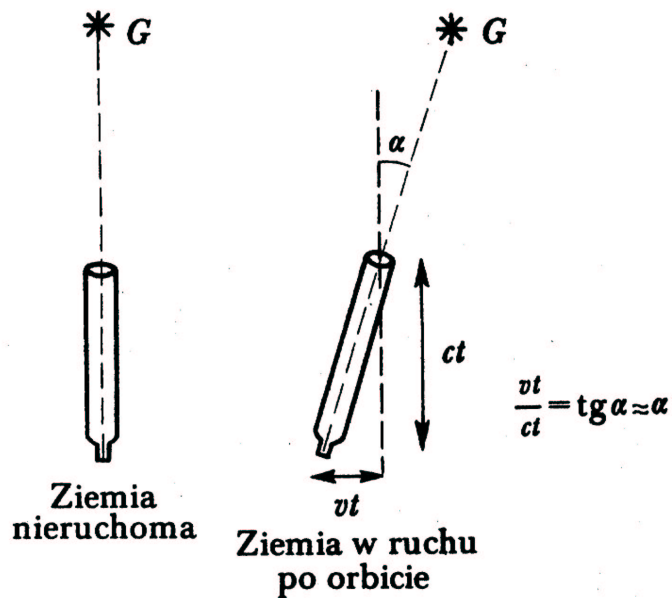


Prędkość światła

Abberacja światła gwiazd

aberracja jest wywołana przez ruch Ziemi dookoła Słońca

pojawia się przy skończonej prędkości rozchodzenia się światła

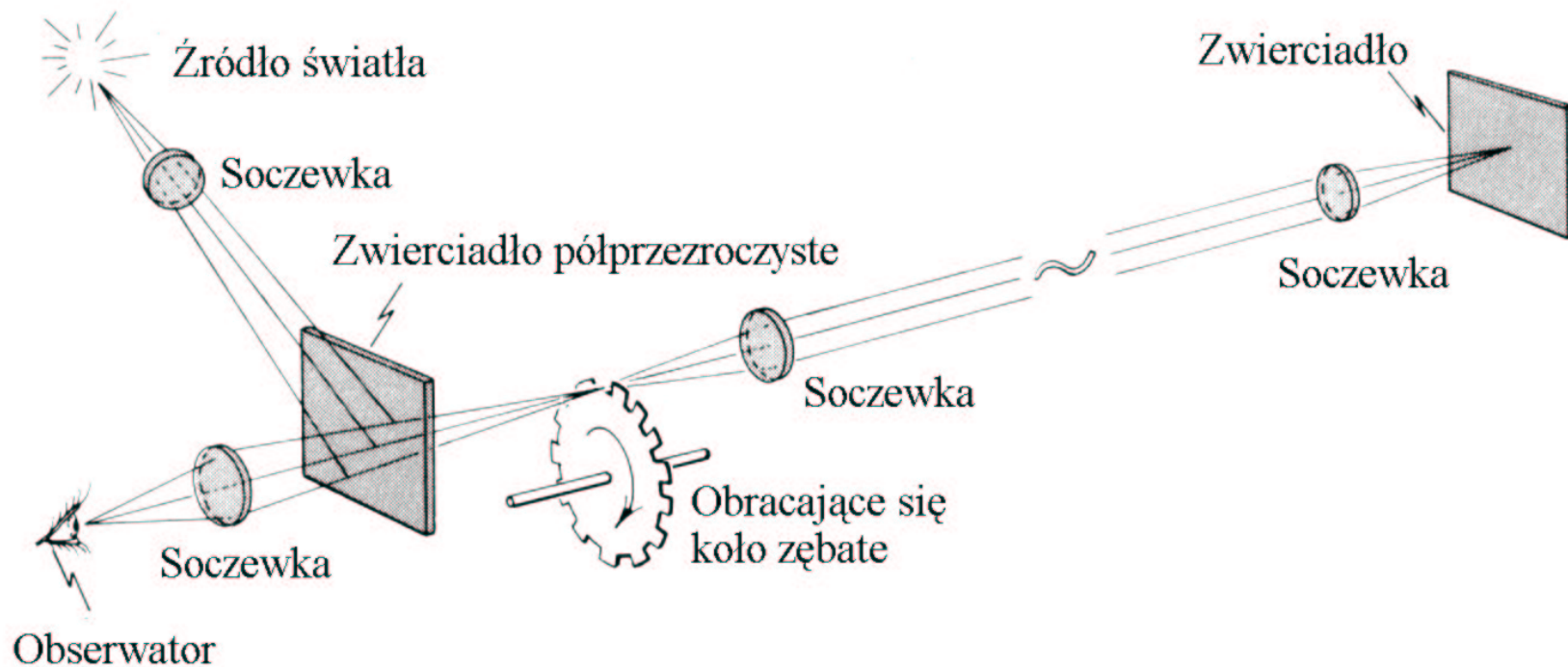


$$\alpha \approx 0.0001 \text{ rad}, \quad v_Z \approx 30 \text{ km/s}$$

Prędkość światła

Pomiar H.L. Fizeau 1849

Pierwszy pomiar w warunkach “laboratoryjnych” (ziemskich)



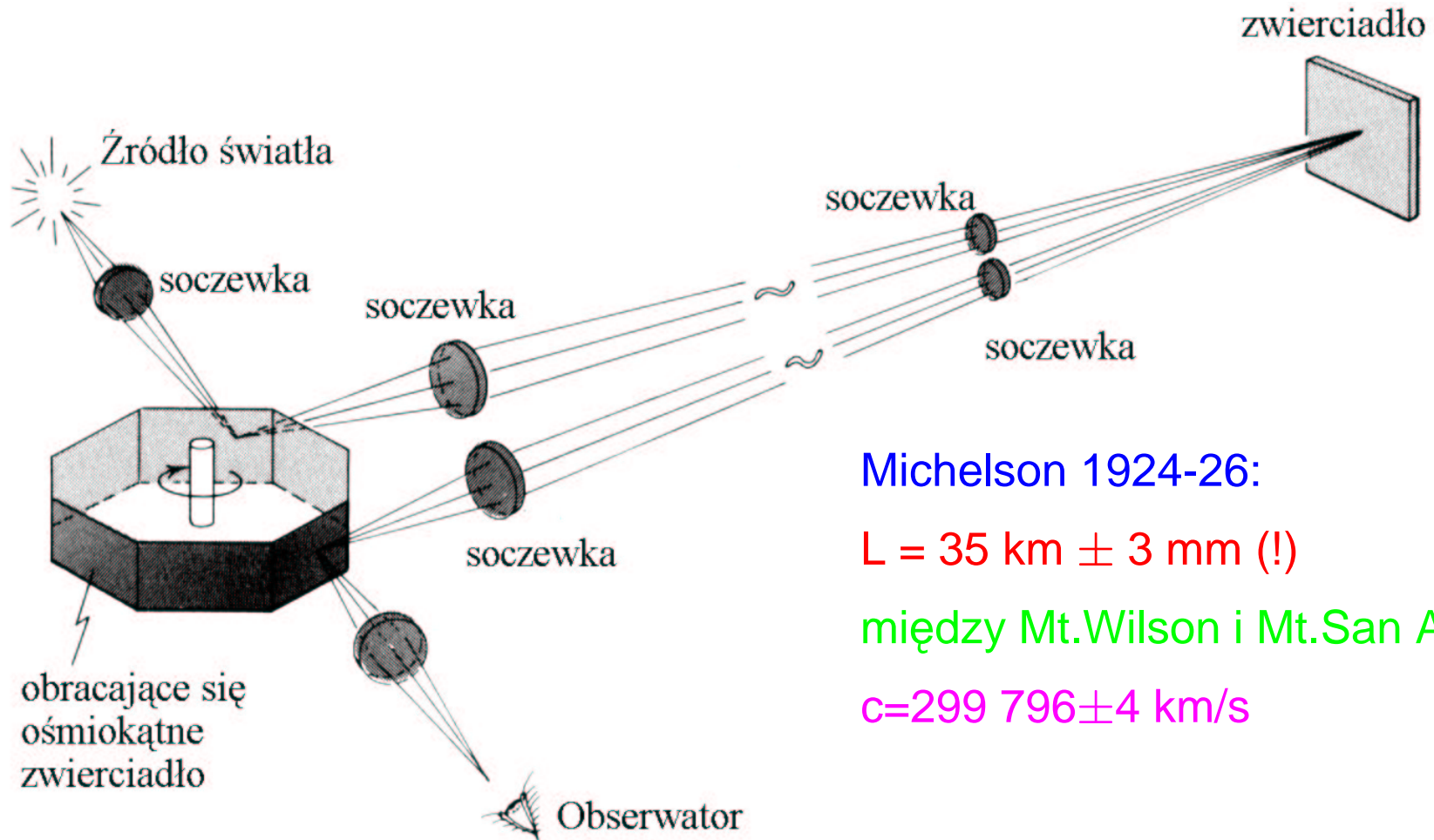
odległość $L = 8633$ m, zębów w “przesłonie” $N = 720$

liczba obrotów przy pierwszym “zaćmieniu” $n = 12.86 \text{ s}^{-1} \Rightarrow c \approx 315300 \text{ km/s}$

Prędkość światła

Metoda Foucault od 1850

Metoda wirującego zwierciadła



Michelson 1924-26:

$L = 35 \text{ km} \pm 3 \text{ mm} (!)$

między Mt.Wilson i Mt.San Antonio

$c = 299\,796 \pm 4 \text{ km/s}$

Prędkość światła

Zależność od częstości

	Częstość [Hz]	c [km/s]
kwanty γ	$1,5 \cdot 10^{24}$	299790 ± 40
widzialne	$5,4 \cdot 10^{14}$	299792,4562 $\pm 0,0011$
podczerwień	$2,5 \cdot 10^{12}$	299792,2 $\pm 0,6$
mikrofale	$1 \cdot 10^{10}$	299792,5 ± 1
radar	$3 \cdot 10^8$	299794,2 $\pm 1,9$
radio	$7,5 \cdot 10^7$	299795 ± 30

W granicach błędów pomiarowych **brak zależności od częstości**

⇒ uniwersalna prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych

Doświadczenie Michelsona-Morleya

1887

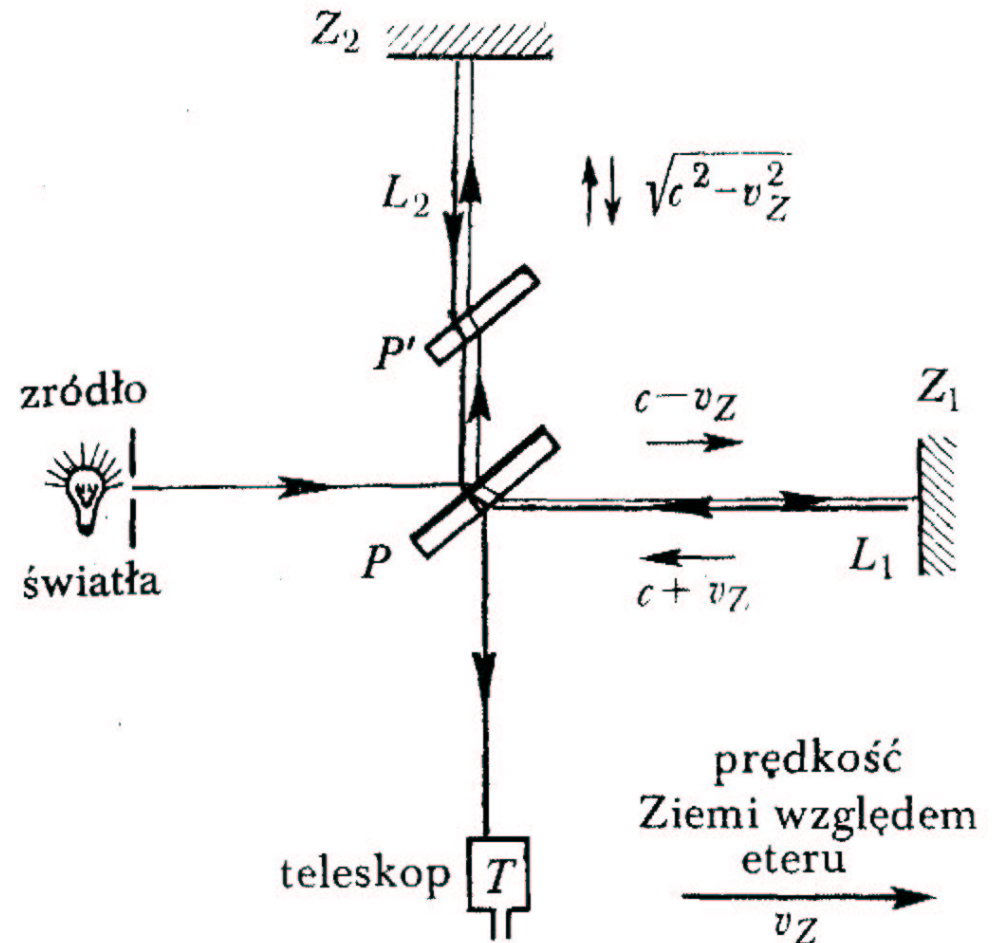
Pomiar prędkości Ziemi względem eteru

Czas przelotu światła w ramionach interferometru:

$$\begin{aligned}\Delta t_1 &= \frac{L_1}{c + v_Z} + \frac{L_1}{c - v_Z} \\ &= \frac{2L_1}{c} \cdot \frac{1}{1 - \beta^2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta t_2 &= \frac{2L_2}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ \beta &= \frac{v}{c}\end{aligned}$$

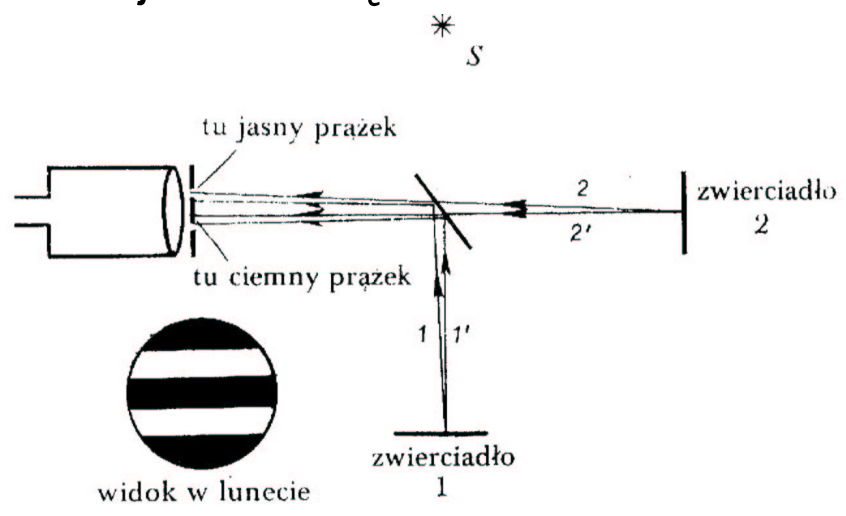
Kierunek ruchu względem eteru jest wyróżniony !



Doświadczenie Michelsona-Morleya

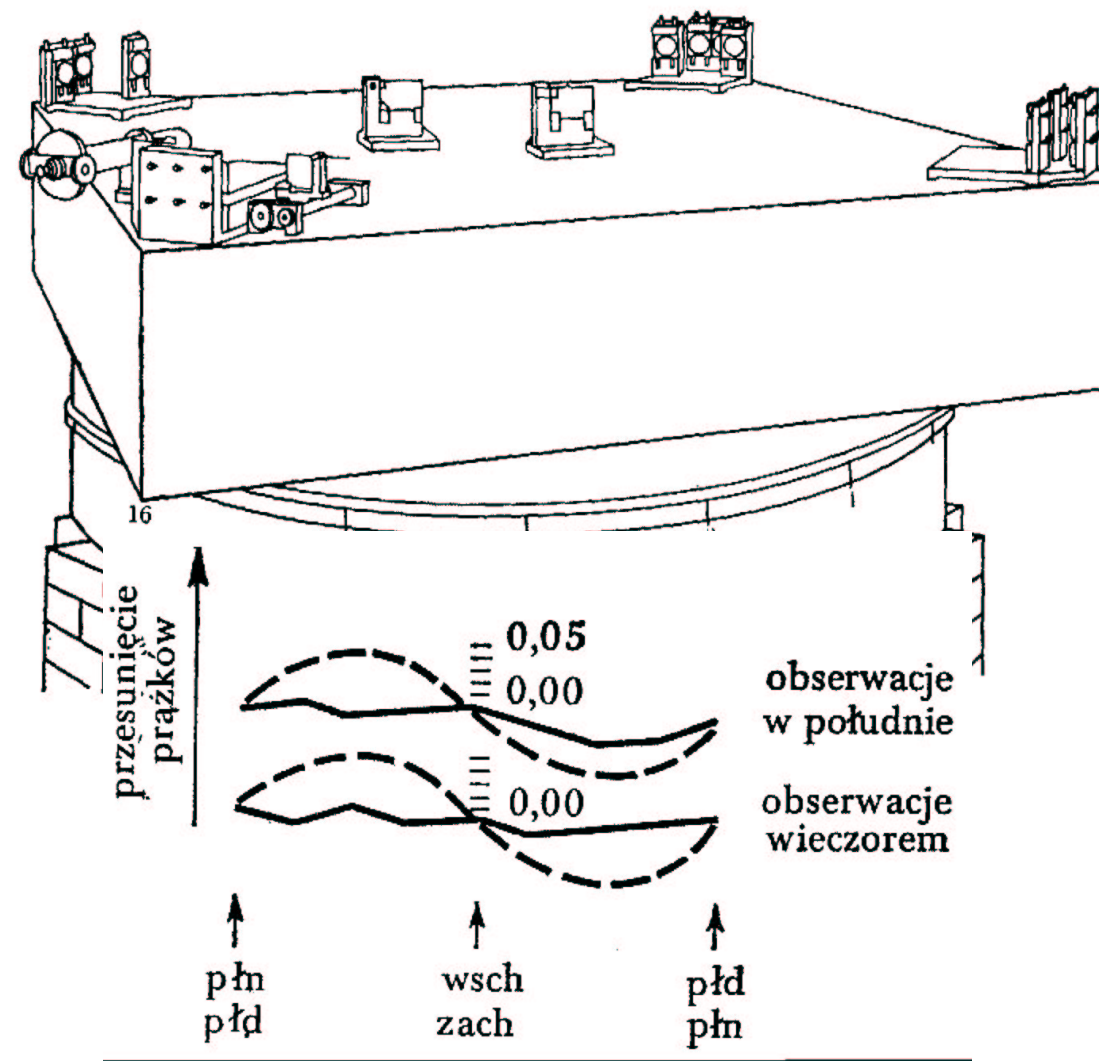
Wyniki

Światło z dwóch ramion interferometru interferuje ze sobą



Przy obrocie interferometru oczekujemy

- ⇒ zmiany $\Delta t_1 - \Delta t_2$
- ⇒ zmiany fazy
- ⇒ przesunięcia prążków interferencyjnych



Brak efektu !!!

Prędkość graniczna

Klasycznie moglibyśmy oczekiwać, że przyspieszane ciało może osiągnąć dowolnie dużą prędkość.

W ruchu jednostajnie przyspieszonym

$$x_0 = V_0 = t_0 = 0$$

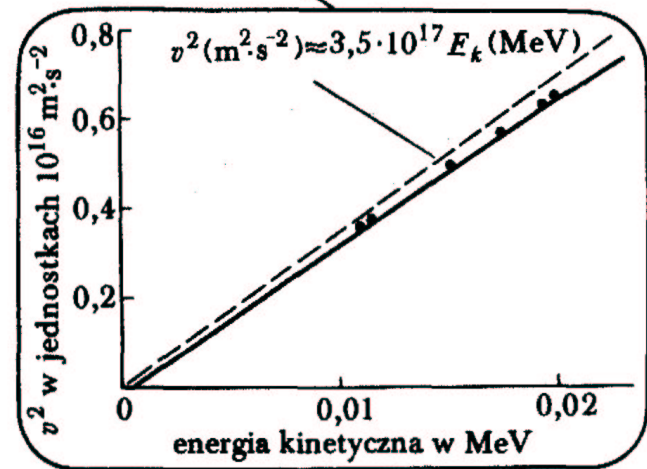
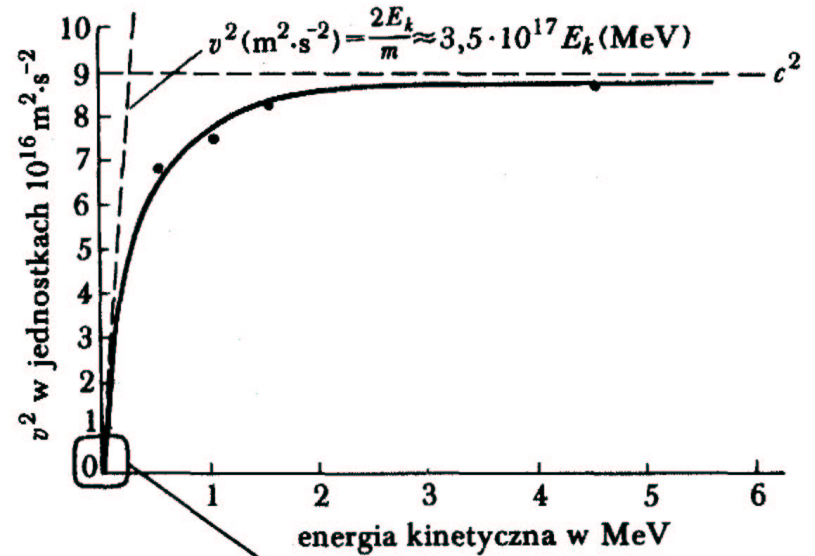
$$V^2 \sim t^2 \sim x$$

Wyniki pomiaru dla elektronów

(Bertozzi, 1964)

Przybliżenie klasyczne działa tylko dla energii kinetycznych $E_k \ll E_0 = mc^2 = 0.511 \text{ MeV}$.

Dla dużych energii wzrost prędkości jest bardzo powolny. Doświadczenie wskazuje na istnienie prędkości granicznej $\approx c$!?!



Prędkość światła

Szczególne własności:

- nie zależy od częstości
- nie zależy od kierunku
- nie zależy od ruchu układu odniesienia (!)
- jest prędkością graniczną dla ciał materialnych (?)

Nie można tych obserwacji wytłumaczyć w ramach fizyki klasycznej (Newtonowskiej).

Uniwersalność prędkości światła stała się postulatem

szczególnej teorii względności Alberta Einsteina (1905)

⇒ to oznacza, że musimy odrzucić transformację Galileusza...

Teoria względności Einsteina

Postulat Einsteina (1905)

Prędkość światła jest uniwersalna i nie zależy od układu odniesienia.
zgodnie z wynikami doświadczeń...

Uniwersalność prędkości światła nie da się jednak pogodzić z uniwersalnością czasu !

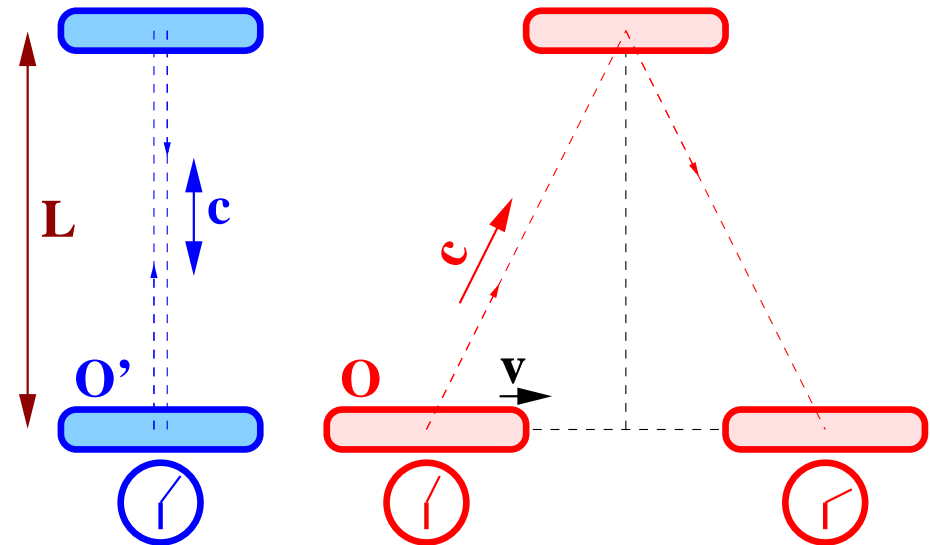
Względność czasu

Obserwator O' odmierza czas przy pomocy zegara świetlnego takt $\Delta t' = \frac{2l}{c}$

Dla obserwatora O światło pokonuje dłuższą drogę $\Rightarrow \Delta t = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}}$

Dylatacja czasu: $\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Dla obserwatora O zegar w O' chodzi wolniej !?!...



Teoria względności Einsteina

Z naszych rozważań wynikało, że czas w jednym układzie biegnie wolniej niż w drugim.

Ale przecież żaden układ nie powinien być wyróżniony !?...

Musimy bliżej zastanowić się jak mierzyć czas.

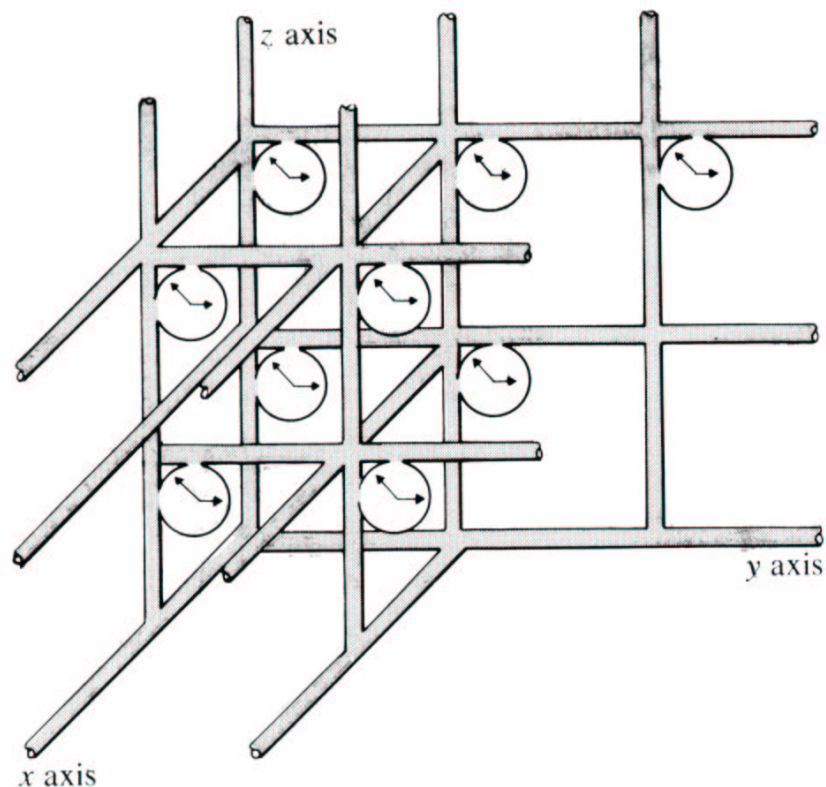
Synchronizacja zegarów

Ponieważ ruch wpływa na pomiar czasu nie wystarczy nam jeden zegar (nie możemy go przesuwać).

Musimy układ współrzędnych “wyposażyć” (przynajmniej myślowo) w całą sieć zegarów.

Synchronizację zegarów możemy przeprowadzić np. wysyłając impuls światła z początku układu

Każdy zegar “zna” swoje położenie i “wie” po jakim czasie światło do niego dotrze...



Teoria względności Einsteina

Dylatacja czasu

W zagadnieniu dylatacji czasu sytuacja nie jest symetryczna

Obserwator O' odmierza czas przy pomocy **jednego zegara**

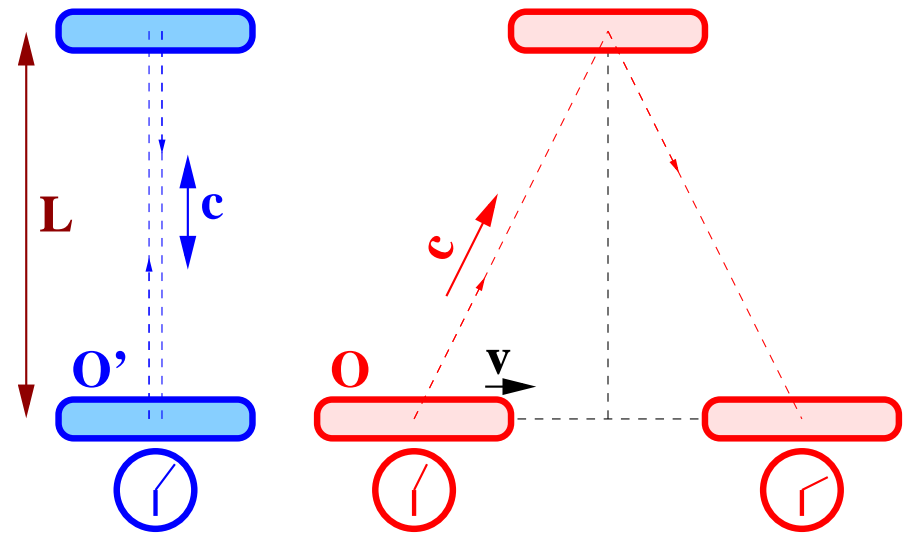
Obserwator O musi użyć **dwóch zegarów**

Dla obserwatora O zegary te są ze sobą **zsynchronizowane** \Rightarrow pomiar jest **poprawny**

Obserwator O' stwierdzi jednak, że pomiar został źle przeprowadzony.

W jego układzie odniesienia zegary O **nie są zsynchronizowane**.

O' stwierdzi też, że wszystkie zegary O odmierzają czas **wolniej** niż powinny !



Dylatacja czasu

Pomiar

Eksperyment z zegarami atomowymi w samolocie (Hafele i Keating, 1972)

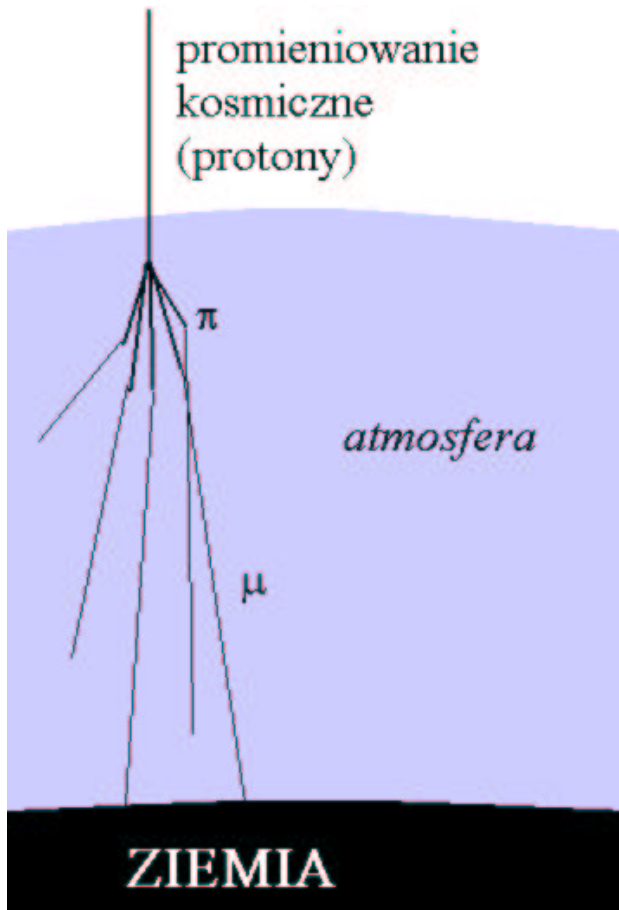
Przewidywania [ns]	Lot na wschód	Lot na zachód
efekt kinematyczny	-184 ± 18	96 ± 10
efekt grawitacyjny	144 ± 14	179 ± 18
suma	-40 ± 23	275 ± 21

Wyniki eksperymentów

zegar 1	-57	277
zegar 2	-74	284
zegar 3	-55	266
zegar 4	-51	266
Średnia	-59 ± 10	273 ± 7

Dylatacja czasu

Czas życia cząstek



Czas życia mionu (w spoczynku): $\tau = 2.2 \mu\text{s}$

Gdyby nie było dylatacji czasu: średni zasięg $\beta c \tau \leq 659 \text{ m}$

Miony produkowane w górnych warstwach atmosfery mają jednak bardzo duże energie: $\langle E \rangle \sim 3 \text{ GeV} \Rightarrow \gamma \sim 30$

Bez problemu docierają do powierzchni Ziemi: $\beta \gamma c \tau \sim 20 \text{ km}$

