

Kinematyka: opis ruchu

Wstęp do Fizyki I (B+C)

Wykład IV:

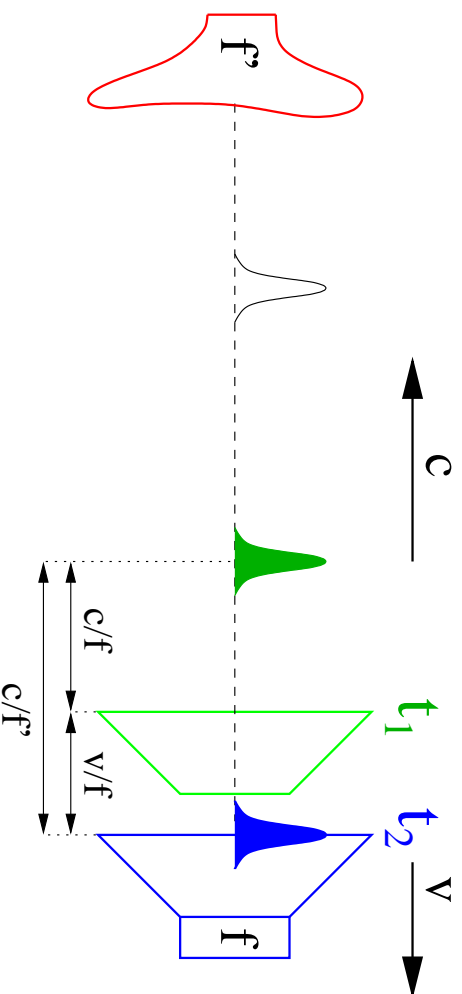
- Efekt Dopplera
- Prędkość światła
 - ⇒ historia pomiarów
 - ⇒ doświadczenie Michelsona-Morleya
 - ⇒ prędkość graniczna

Efekt Dopplera

Ruchome źródło

źródło dźwięku o częstotliwości f poruszające się z prędkością v względem ośrodka w którym prędkość dźwięku wynosi c .

Dla uproszczenia: krótkie impulsy wysyłane co $\Delta t = 1/f$:



t_1 - wystanie pierwszego impulsu

t_2 - wystanie drugiego impulsu

odległość między impulsami:

$$\frac{c}{f'} = \lambda' = \frac{c}{f} + \frac{v}{f}$$

ruch impulsu ruch źródła

Częstość dźwięku i **długość fali**

mierzona przez obserwatora nieruchomego względem ośrodka:

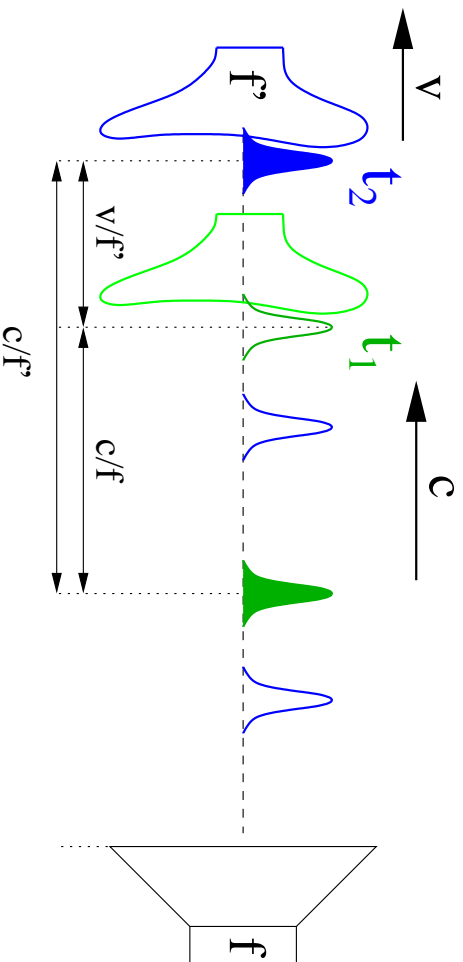
$$f' = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}}$$

$$\lambda' = \lambda \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

Efekt Dopplera

Ruchomy obserwator

obserwator porusza się z prędkością v względem ośrodka i źródła dźwięku



Mierzona częstość i długość fali:

$$f' = f \left(1 - \frac{v}{c} \right)$$

$$\lambda' = \frac{\lambda}{1 - \frac{v}{c}}$$

aby dogonić obserwatora impuls
musi pokonać odległość

$$\frac{c}{f'} = \lambda' = \frac{c}{f} + \frac{v}{f'}$$

odległość
początkowa

ruch
obserwatora

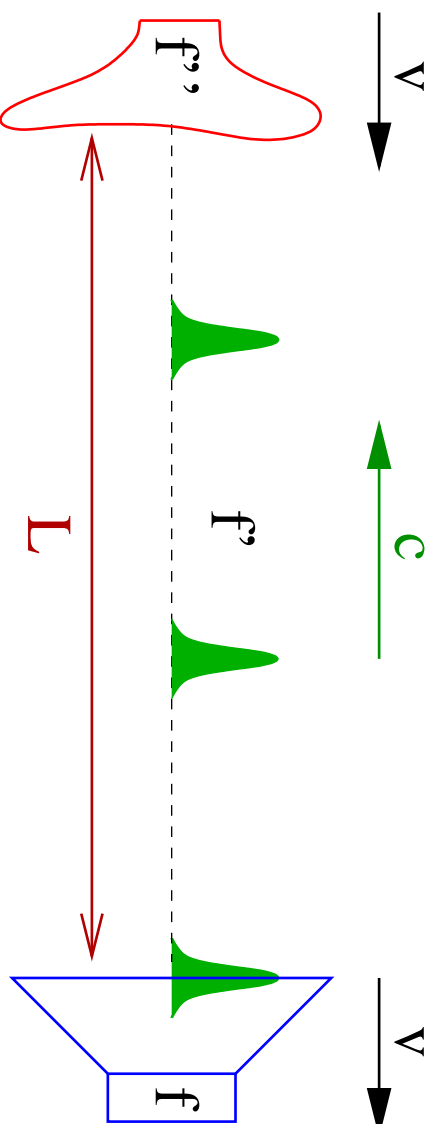
W klasycznym efekcie Dopplera zmiana częstości zależy nie tylko od względnej prędkości źródła i obserwatora ale i ruchu względem ośrodka.

Efekt Dopplera

Ruch ośrodka

Przyjmijmy, że źródło dźwięku i obserwator są względem siebie w spoczynku.

Niech ich prędkość względem ośrodka wynosi v



Częstość mierzona przez obserwatora jest wynikiem złożenia **dwóch efektów** Dopplera:

$$f'' = f' \left(1 + \frac{v}{c} \right) = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}} \cdot \left(1 + \frac{v}{c} \right) = f$$

Częstość się nie zmienia, ale zmienia się czas między wysłaniem a rejestracją impulsu:

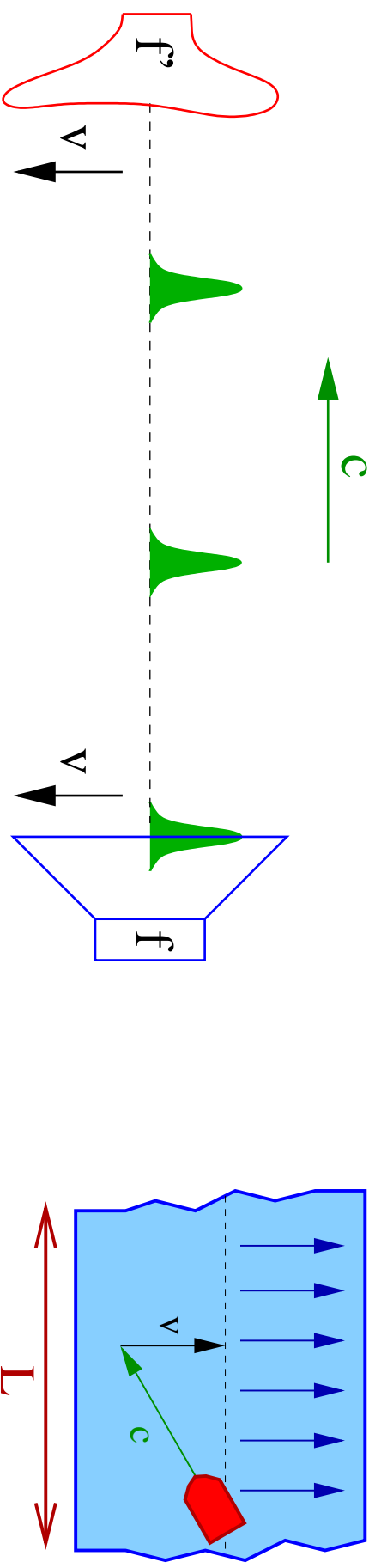
$$\Delta t' = \frac{L}{c + v} = \frac{L}{c} \cdot \frac{c}{c + v} = \frac{\Delta t}{1 + \frac{v}{c}} \Rightarrow \text{przesunięcie w fazie}$$

Efekt Dopplera

Ruch ośrodka

źródło dźwięku i obserwator nie muszą poruszać się w ośrodku wzdłuż linii je łączącej...

Rozważmy ruch w kierunku prostopadłym:



przeprawa łódką przez rzekę

Częstość mierzona w dowolnym punkcie na linii łączącej źródło i obserwatora wynosi f

Czas między wystąpieniem a rejestracją impulsu:

$$\Delta t' = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{L}{c} \cdot \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Czas propagacji zależy od prędkości układu źródło-obserwator względem ośrodka.

Prędkość światła

Prędkość można wyznaczyć na dwa sposoby

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

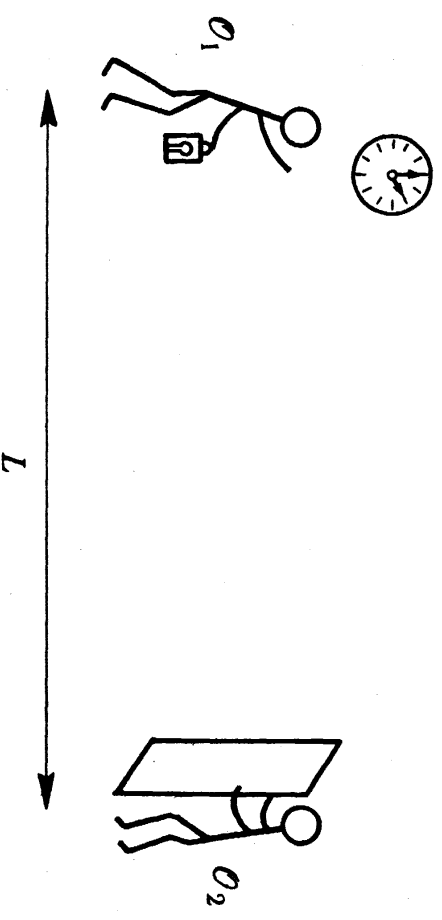
w przypadku prędkości światła praktyczna jest tylko pierwsza metoda

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...



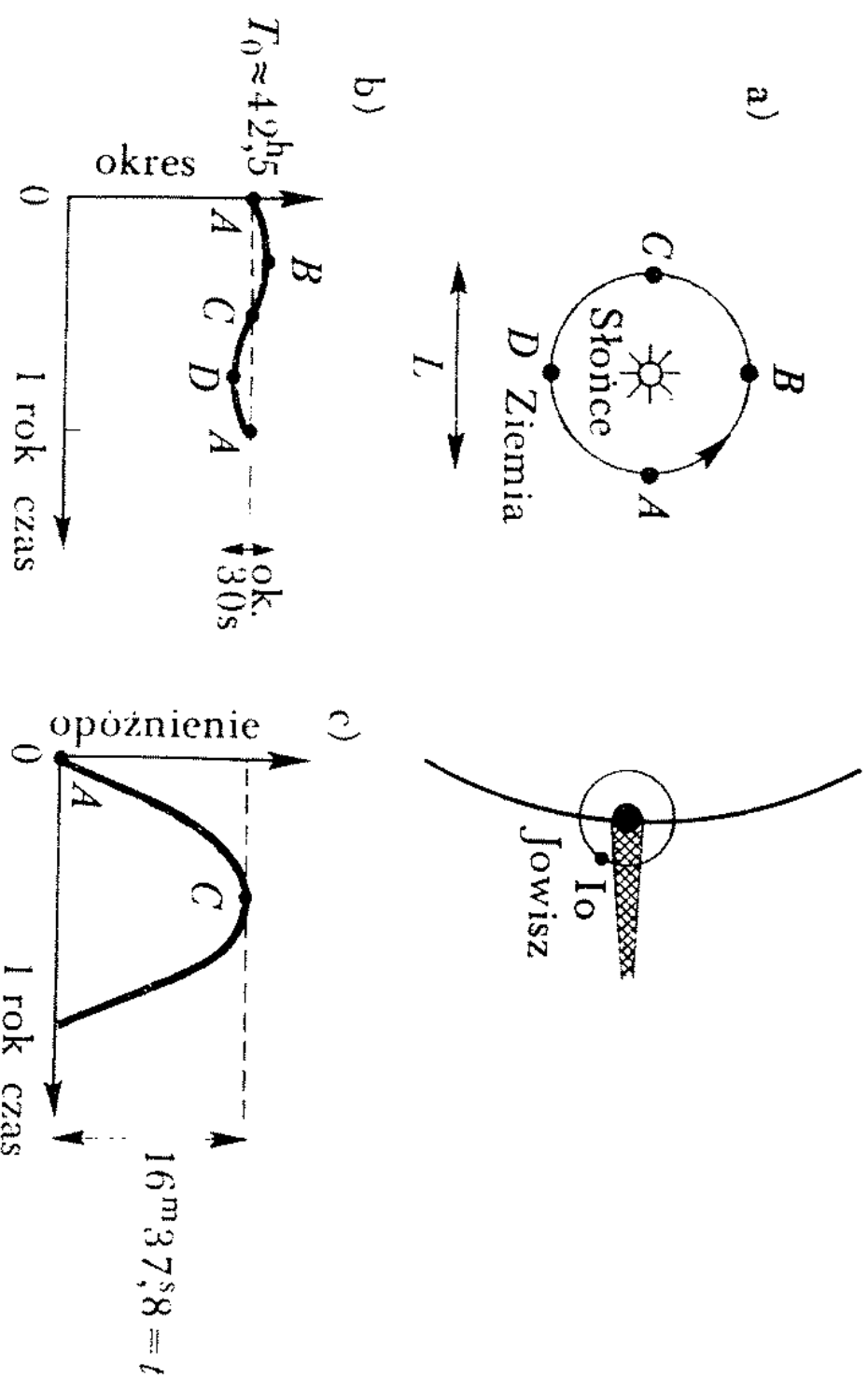
Prędkość światła

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 $16^m37^s.8$ (~1000 s).



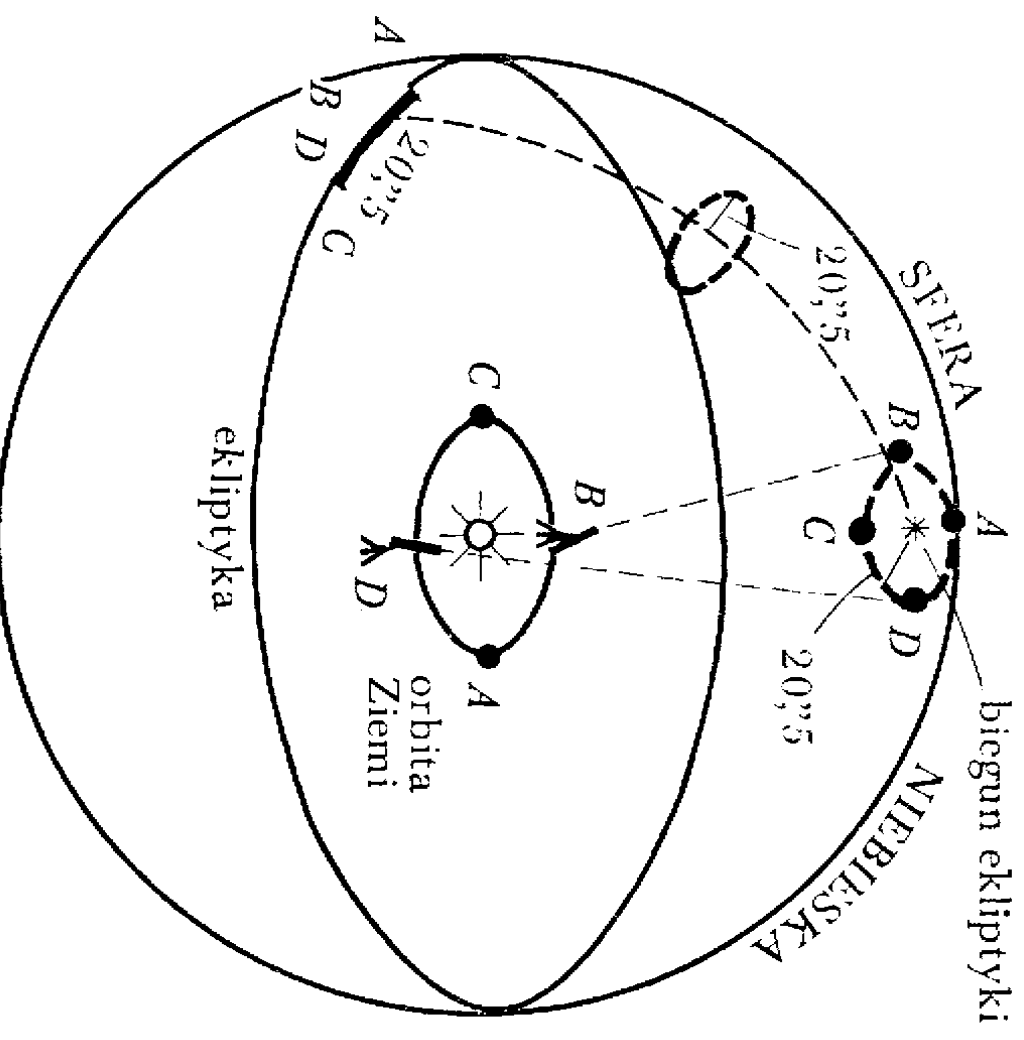
Prędkość światła

Abberacja światła gwiazd

pozorny ruch położenia katowego
odległych gwiazd

William Bradley (1727)

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

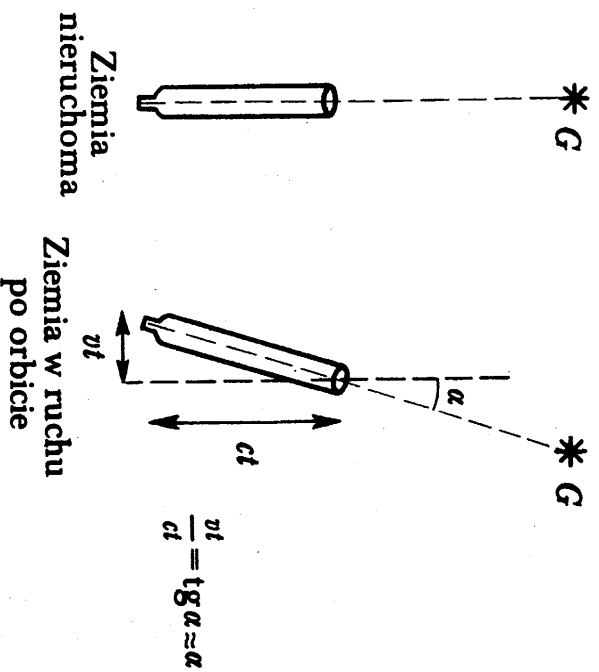


Prędkość światła

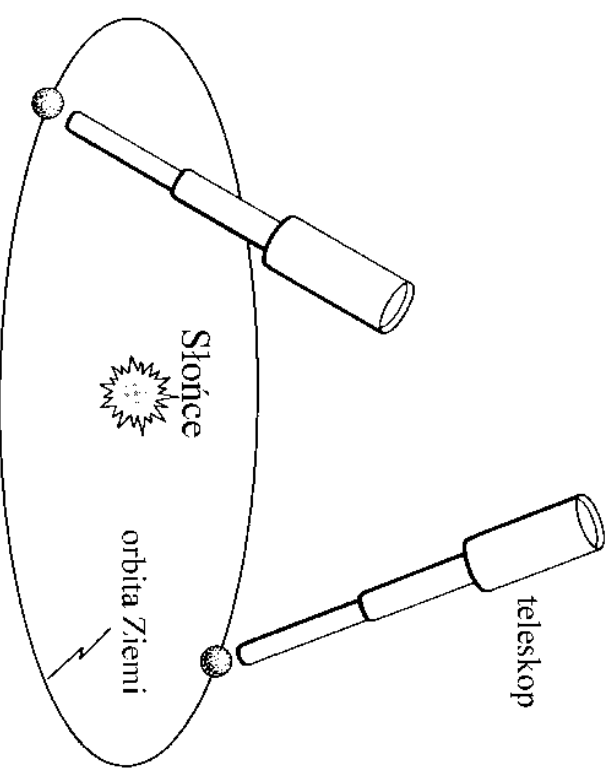
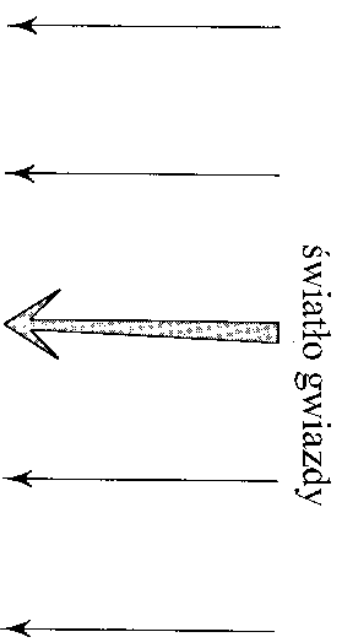
Abberacja światła gwiazd

aberracja jest wywołana przez ruch Ziemi dookoła Słońca

pojawia się przy skończonej prędkości rozchodzenia się światła



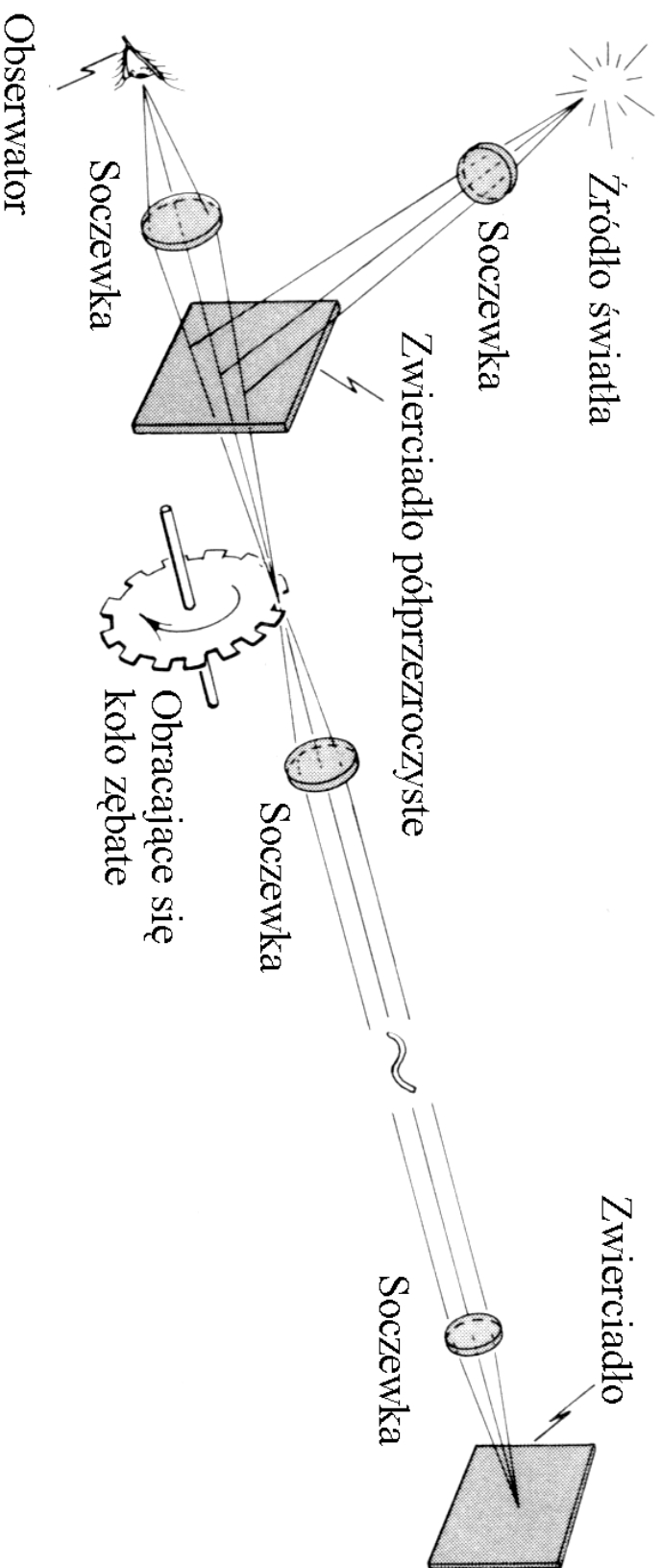
$\alpha \approx 0.0001$ rad, $v_Z \approx 30$ km/s



Prędkość światła

Pomiar H.L. Fizeau 1849

Pierwszy pomiar w warunkach "laboratoryjnych" (ziemskich)



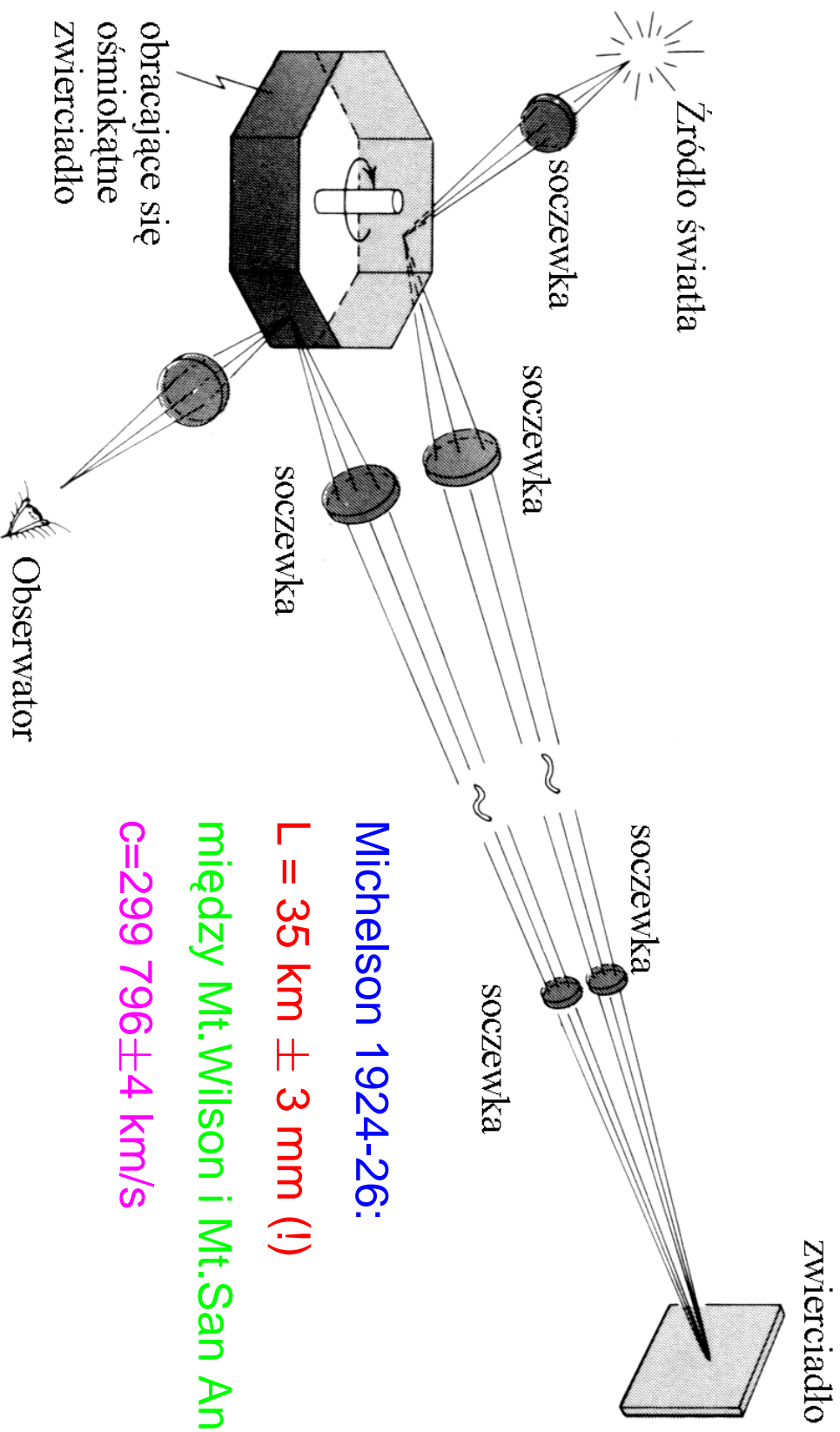
odległość $L = 8633$ m, zębów w "przesłonie" $N = 720$

liczba obrotów przy pierwszym "zaciemnieniu" $n = 12.86$ s⁻¹ $\Rightarrow c \approx 315300$ 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 częstotści

	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 częstotści**

⇒ **uniwersalna prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych**

Doświadczenie Michelsona-Morleya

1887

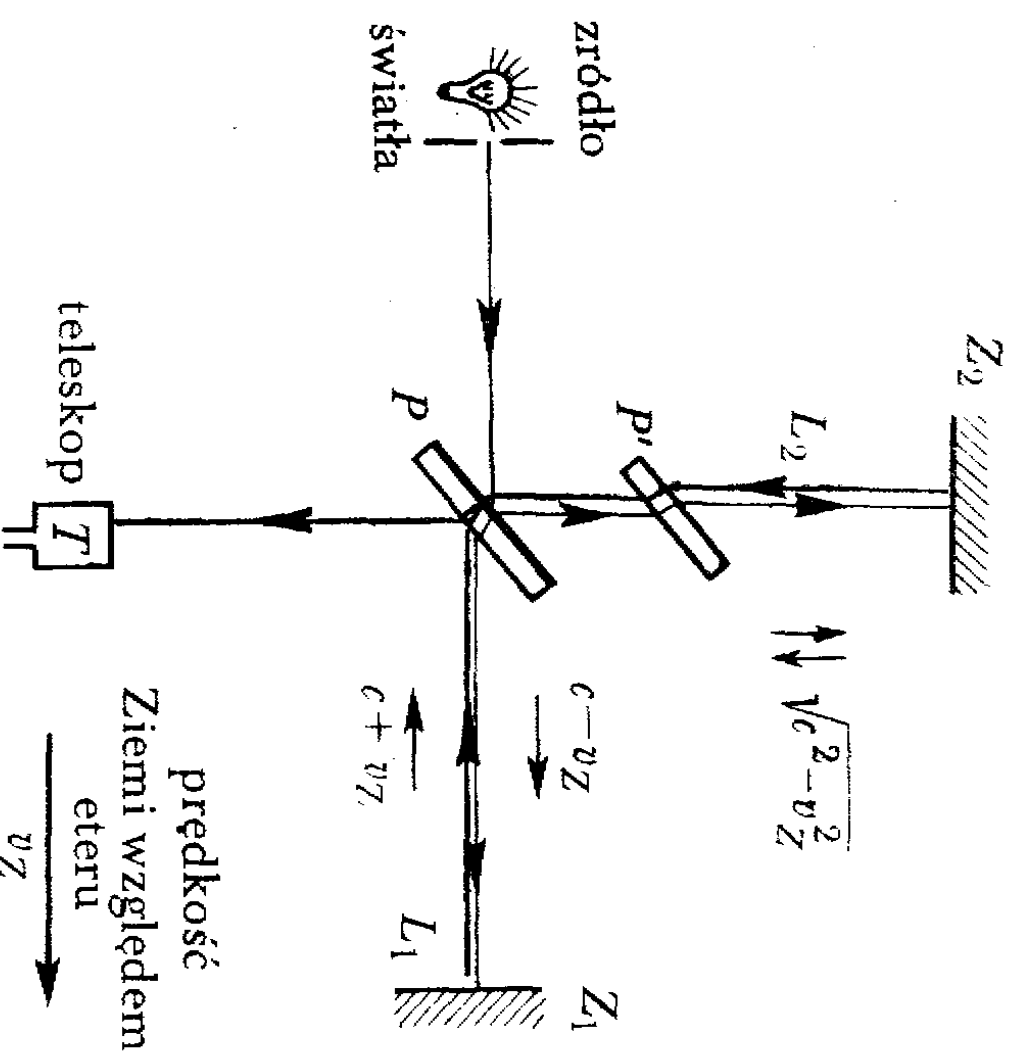
Pomiar prędkości Ziemi względem eteru

Czas przelotu światła w ramionach interferometru:

$$\begin{aligned}\Delta t_1 &= \frac{L_1}{c+v_Z} + \frac{L_1}{c-v_Z} \\ &= \frac{2L_1}{c} \cdot \frac{1}{1-\beta^2} \\ \Delta t_2 &= \frac{2L_2}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\end{aligned}$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

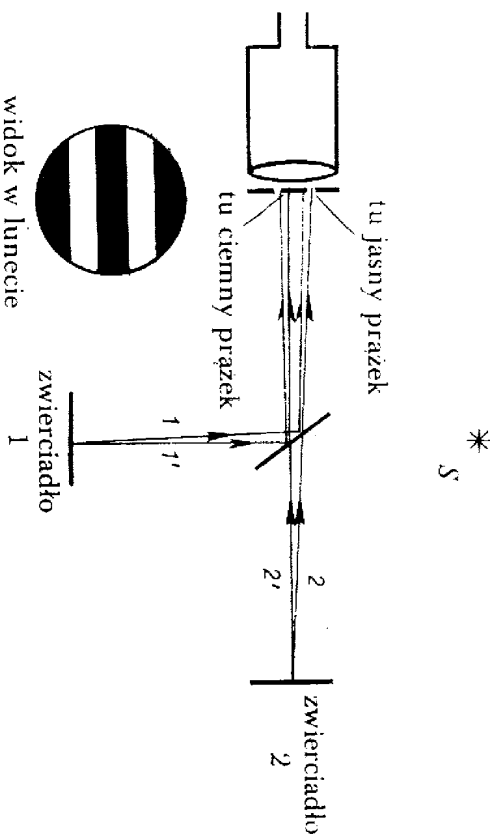
Kierunek ruchu względem eteru jest wyróżniony !



Doświadczenie Michelsona-Morleya

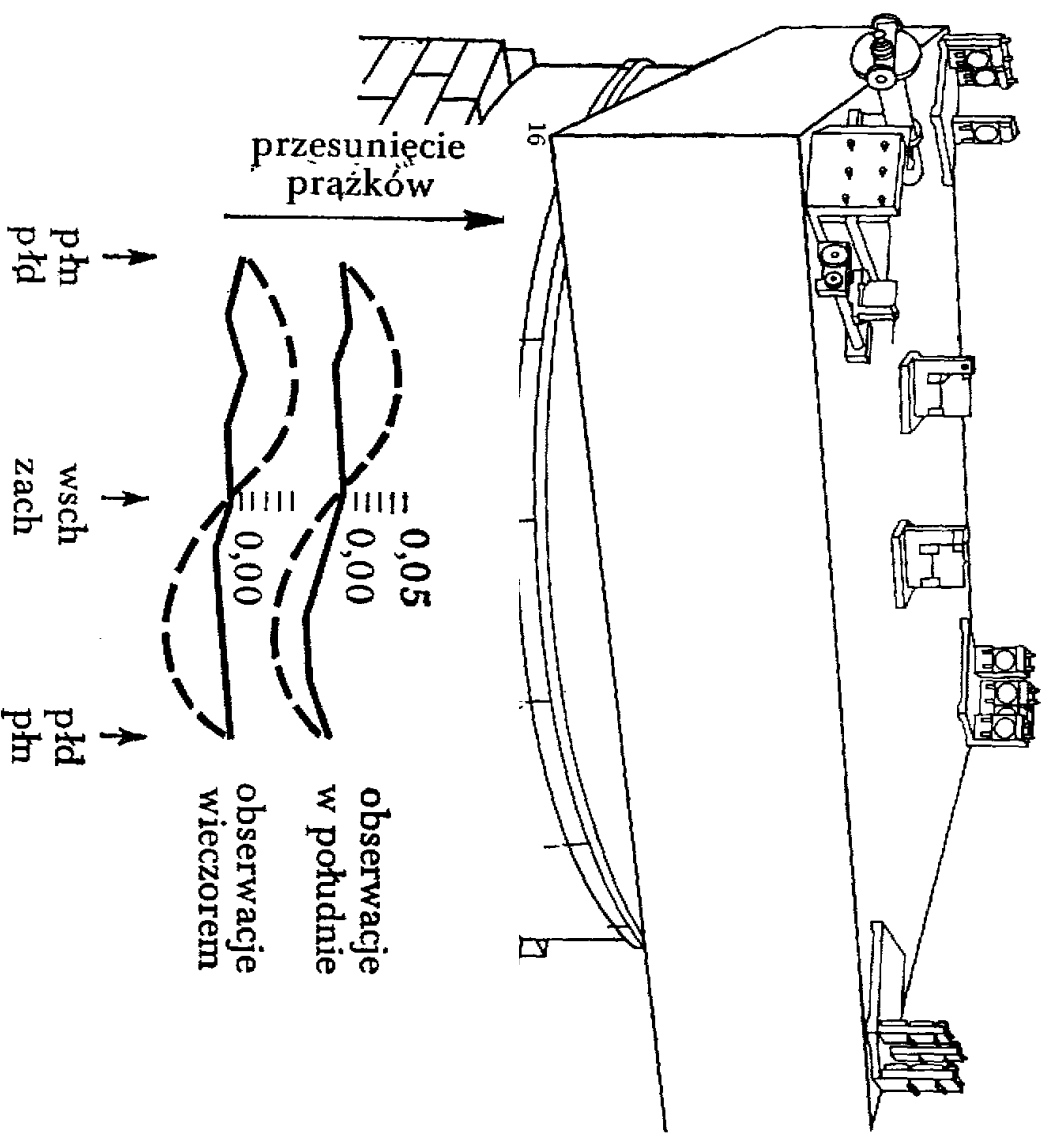
Wyniki

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

$$x_0 = V_0 t_0 = 0$$

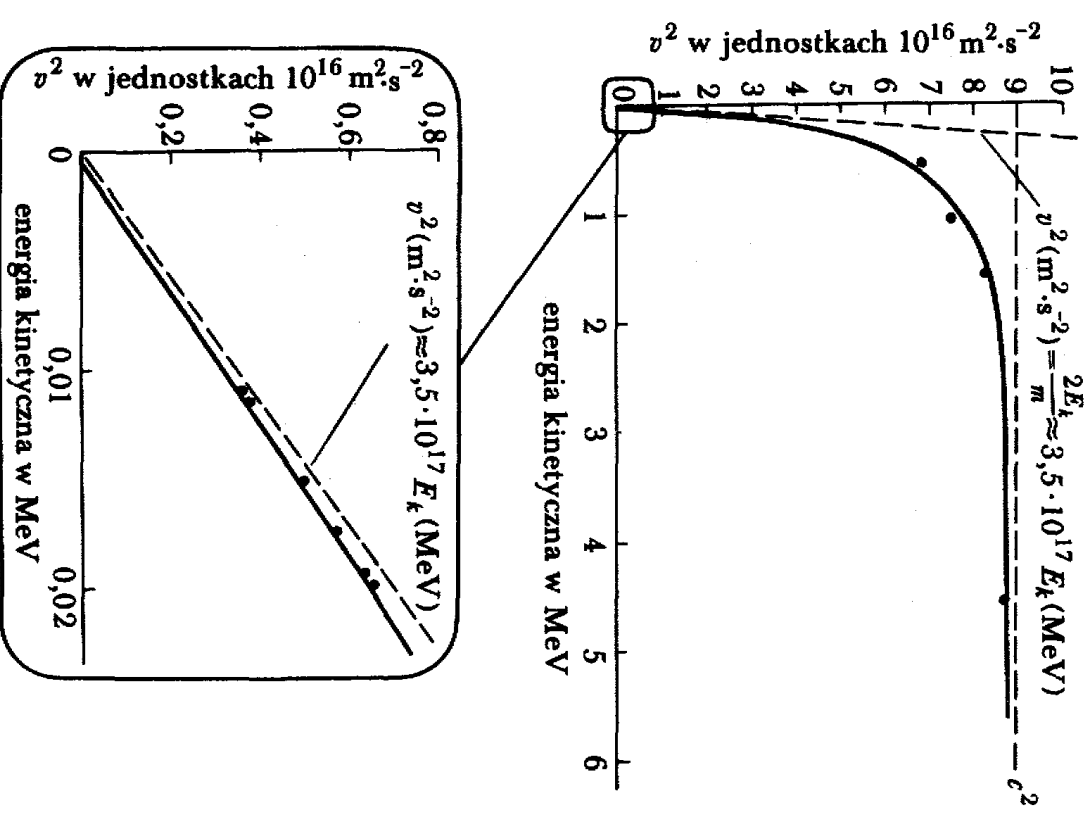
$$V^2 \sim t^2 \sim x$$

Wyniki pomiaru dla elektronów \Rightarrow

(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

Podsumowanie

Prędkość światła

- 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).

Universalność prędkości światła stała się postulatem

szczególnej teorii względności Alberta Einsteina (1905)

⇒ następne wykłady...