

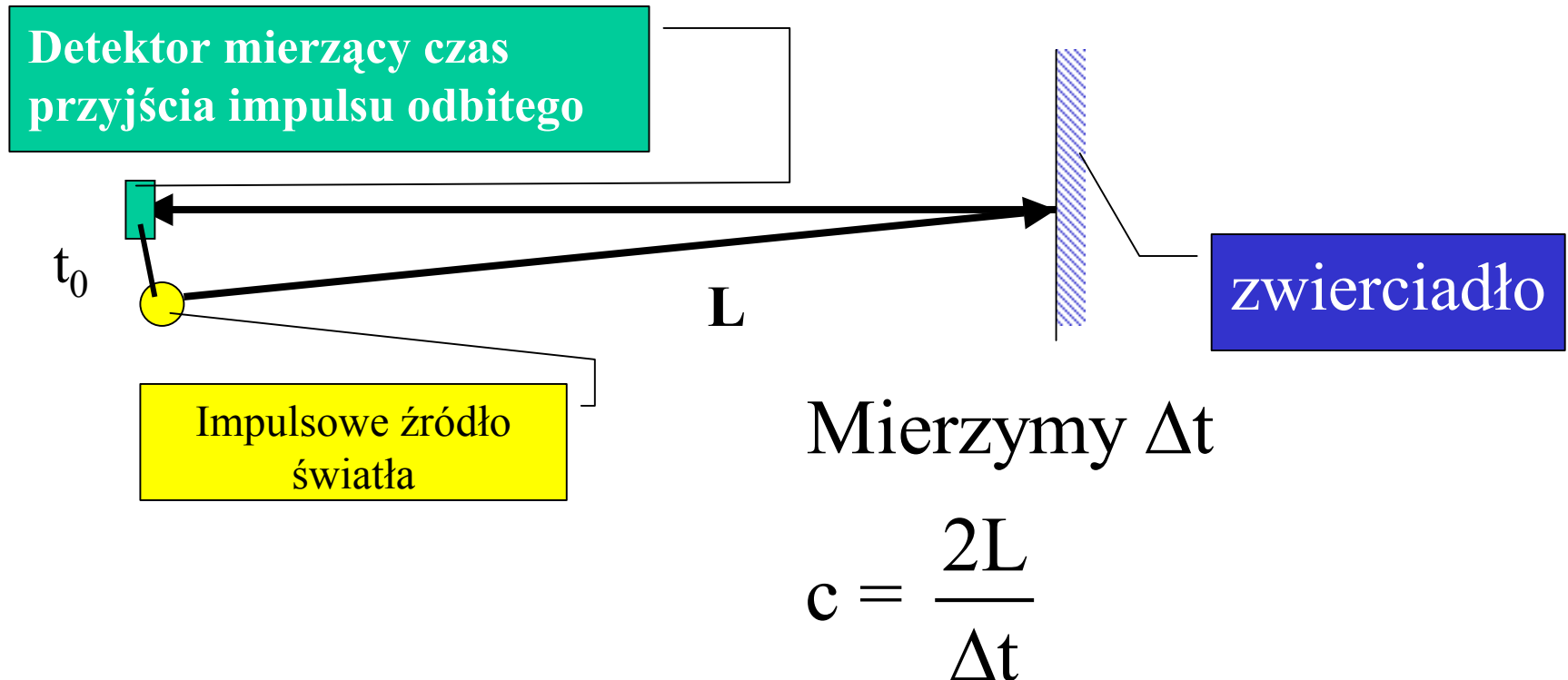
II.5 Prędkość światła jako prędkość graniczna

- Pomiar prędkości światła
- Doświadczalne dowody na to, że c jest prędkością graniczną we Wszechświecie

Od 1983 prędkość światła jest powiązana ze wzorcem metra i czasem 1 sekundy i wynosi (ex definitione): $c=299\,792\,458$ m/s. Nie zawsze tak jednak było...

Pomiary prędkości światła

- Metodę zaproponował Galileusz (1638), ale nie umiał jej zrealizować w praktyce z zadawalającą dokładnością (stwierdził, że c jest bardzo duże- próbował określić jej DOLNĄ granicę):



Układ pomiarowy na wykładzie

Soczewka skupiająca

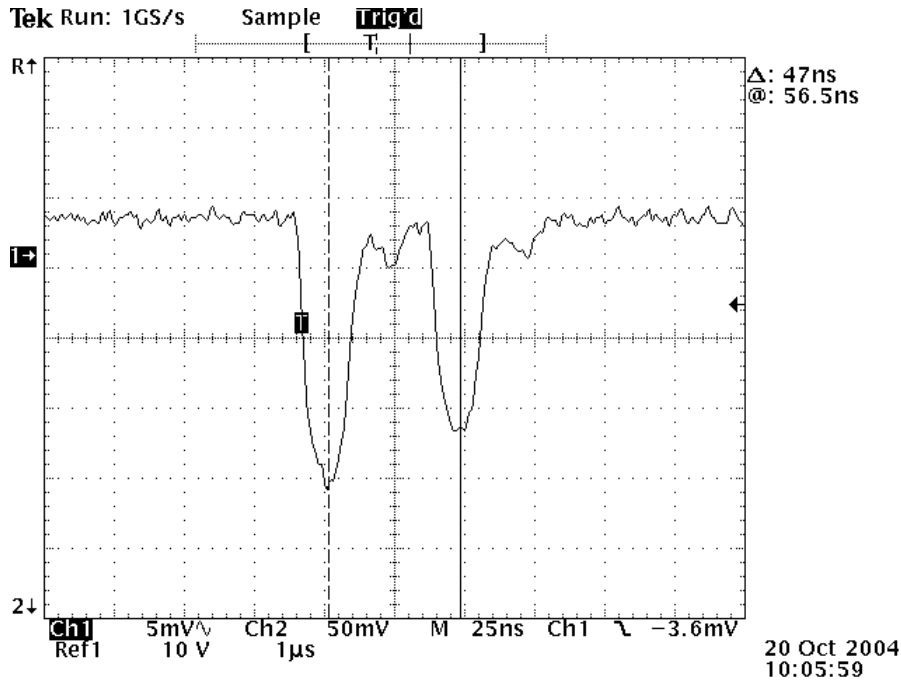
Detektor promieniowania

Laser impulsowy (500 Hz)



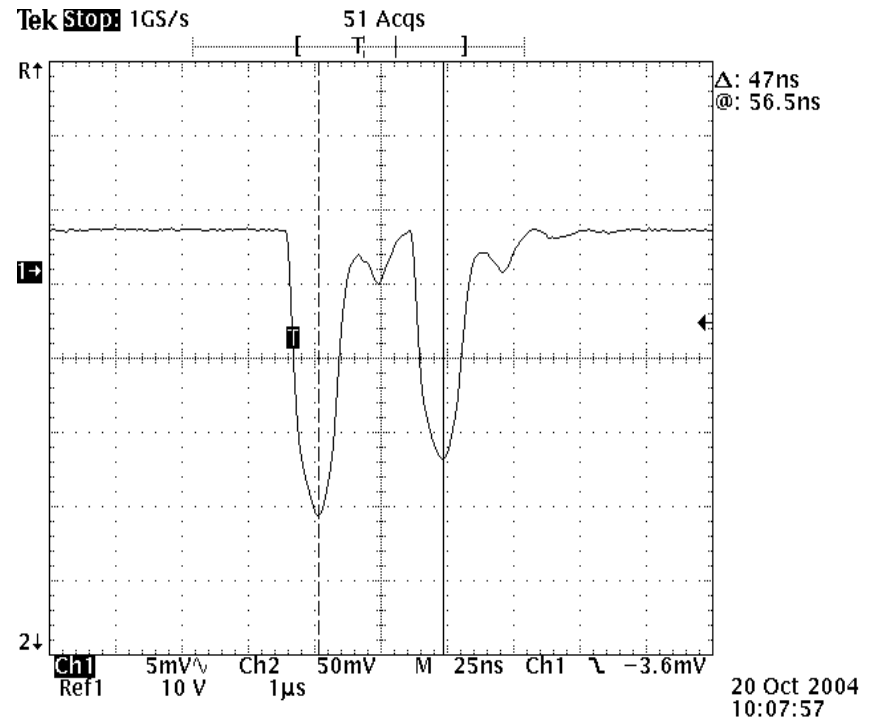
Płytką półprzepuszczającą i
zwierciadło

Wyniki- za pomocą oscyloskopu cyfrowego (2004)



Pojedynczy pomiar

Średnia z kilkudziesięciu pomiarów



Historia pomiarów c

Fascynująca historia pomiarów c oraz różne metody doświadczalne opisane są szczegółowo w podręczniku profesorów Wróblewskiego i Zakrzewskiego, t.1, Rozdz. II.

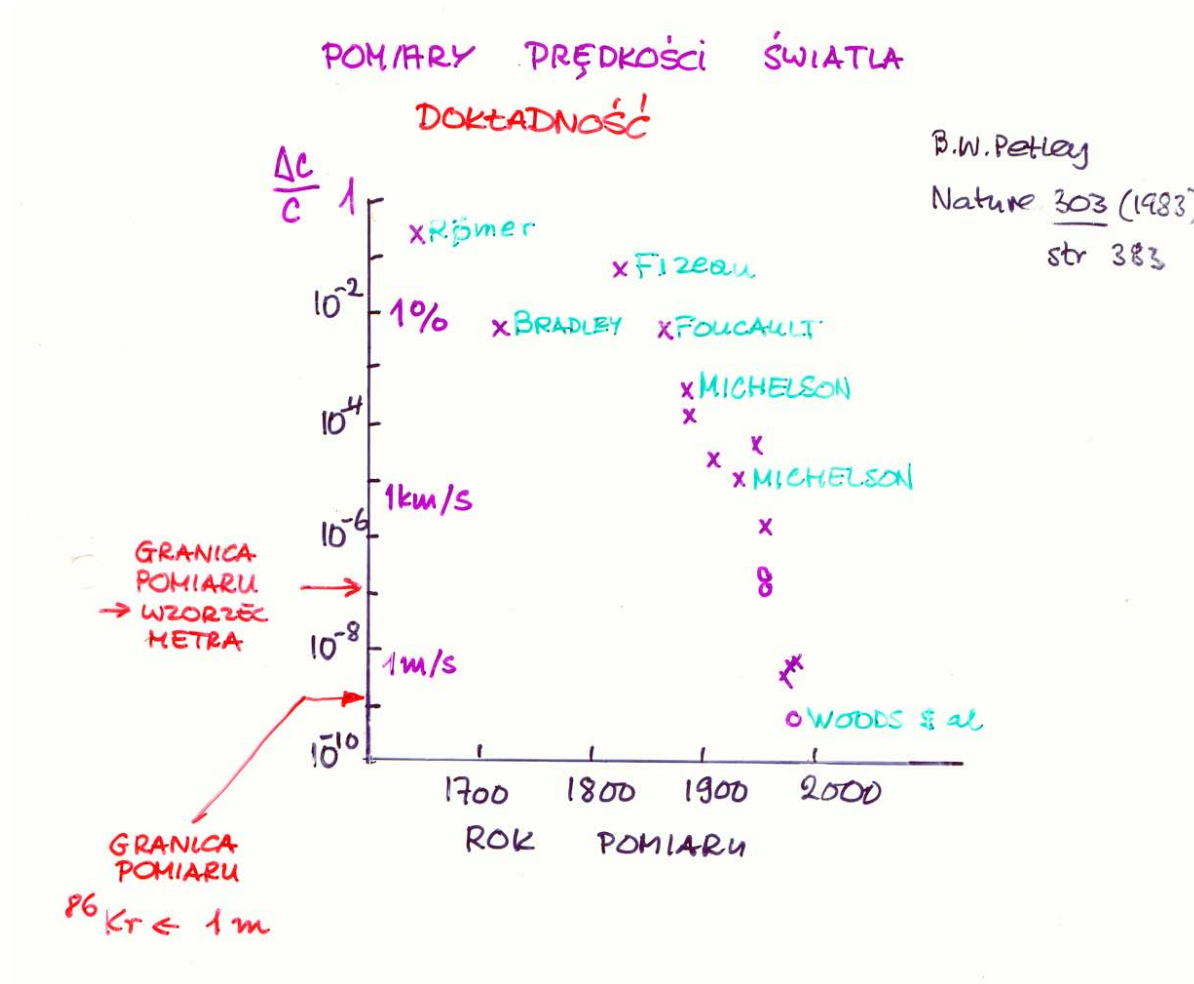
Tutaj omówimy tylko niektóre wybrane fakty.

Historia pomiarów c

Niektóre ważne metody i wyniki

Rok	Przez kogo?	Metoda	Wynik [m/s]
1676	Roemer	Astronomiczna: zaćmienia Io	214 000 000 (~30%)
1727	Bradley	Astronomiczna: aberracja światła	301 000 000 (~10%)
1849	Fizeau	Lab.: Modulacja wiązki światła kołem zębatym. Baza pomiaru 8633 m.	315 000 000 (duży błąd systematyczny)
1902	Perrotin	jw.	299 880 000 (84 000)
1850-1862	Foucault (Arago)	Lab.: modulacja wiązki światła metodą wirującego zwierciadła	298 000 000 (500 000)
1878-1926	Michelson	Jw. ,ostatnio na bazie 35 km w powietrzu jw., w próżni na bazie 1.6 km	299 796 000 (4 000) 299 774 000 (11 000)
1929-1969	Karolus & Mittelstaedt/ inni	Lab.: modulacja światła komórką Kerra, modulacja czułości detektora	1927: 299 784 000 (20 000) 1962: 299 792 500 (50)

Dokładność pomiarów c



Prędkość światła nie zależy od częstości (energii) fotonów. Przykładowe wyniki pomiarów z różnych doświadczeń:

	Częstość (Hz)	c (km/s)	
fotony 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	10^{10}	299792,5	± 1
radar	$3 \cdot 10^8$	299794,2	$\pm 1,9$
radio	$7,5 \cdot 10^7$	299795	± 30

[wniosek z obserwacji gwiazd rozblyskowych: światło widzialne i fale radiowe dobiegają do Ziemi jednocześnie \Rightarrow prędkość jednakowa z dokładnością 10^{-7}]

Fotony są cząstkami o zerowej masie

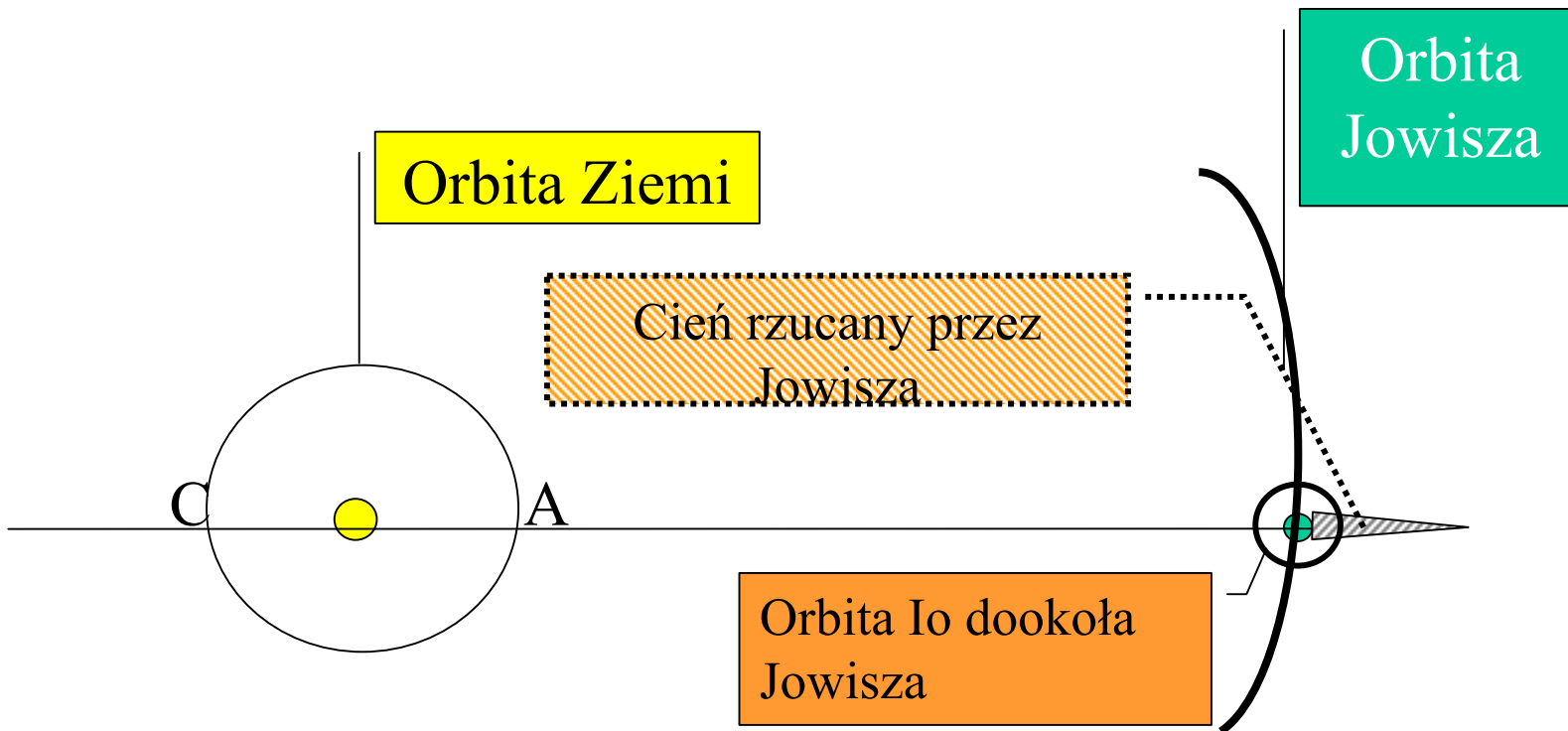
Prędkość światła nie zależy od kierunku we Wszelchświecie

$c = \text{const}$

- Dokładne pomiary interferometryczne (ulepszony interferometr Michelsona) pokazały, że c jest jednakowe we wszystkich kierunkach w przestrzeni z dokładnością do ok. 30 m/s!
- Prędkość światła wysyłanego przez poruszające się źródła (np. kwanty gamma z rozpadów w locie π^0 o prędkości $0.99975c$) zgadza się z c z dokładnością 50 m/s.

Pomiary Roemera 1676

Pierwszą skończoną wartość wyznaczył astronom Roemer w 1676 obserwując roczne zmiany okresu zaćmień Io – księżycy Jowisza.



Pomiary Roemera

Okres obiegu Io dookoła Jowisza można dokładnie wyznaczyć obserwując jej zaćmienia: $T_0 = 42^{\text{h}}28^{\text{m}},5$. W porównaniu do pomiarów T_0 w A, w punkcie C czas pomiędzy zaćmieniami będzie dłuższy o czas przelotu światła przez średnicę orbity Ziemi, której zmierzona w czasach Roemera wartość wynosiła ok. 282×10^6 km. Ta różnica czasów wynosiła, zdaniem Roemera ~22 minuty (obecnie zmierzono $16^{\text{m}}38^{\text{s}},8$).

Roemer otrzymał

$$c = \frac{282 \cdot 10^6 \text{ km}}{22 \cdot 60 \text{ s}} \approx 214\,000 \text{ km/s}$$

Obecnie dostalibyśmy $c = \frac{292.2 \cdot 10^6 \text{ km}}{997.8 \text{ s}} \approx 299\,860(100) \text{ km/s}$

Pomiary Roemera cd.

Nie wszyscy współcześni Roemerowi uwierzyli, że wartość c jest skończona.

Dopiero zaobserwowanie aberracji światła przez Bradley'a w 1725 przekonało niedowiarków (patrz niżej)

Znaczenie pomiarów Roemera polega również na tym, że w jego metodzie mierzy się czas przelotu światła tylko w jedną stronę, podczas gdy w pomiarach na Ziemi na ogół mierzy się czas przelotu tam i z powrotem.

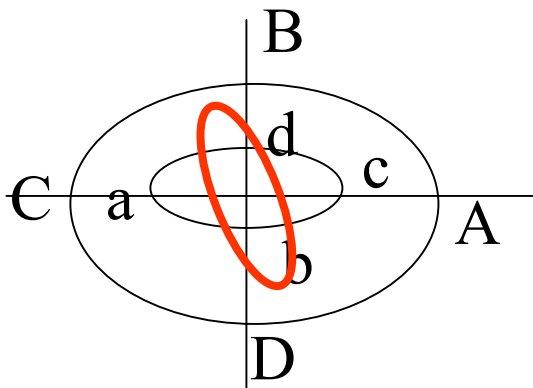
Aberracja światła (Bradley 1725-27)

Bradley rozpoczął w 1725 pomiary przesunięć paralaktycznych gwiazd w celu zmierzenia odległości do nich.

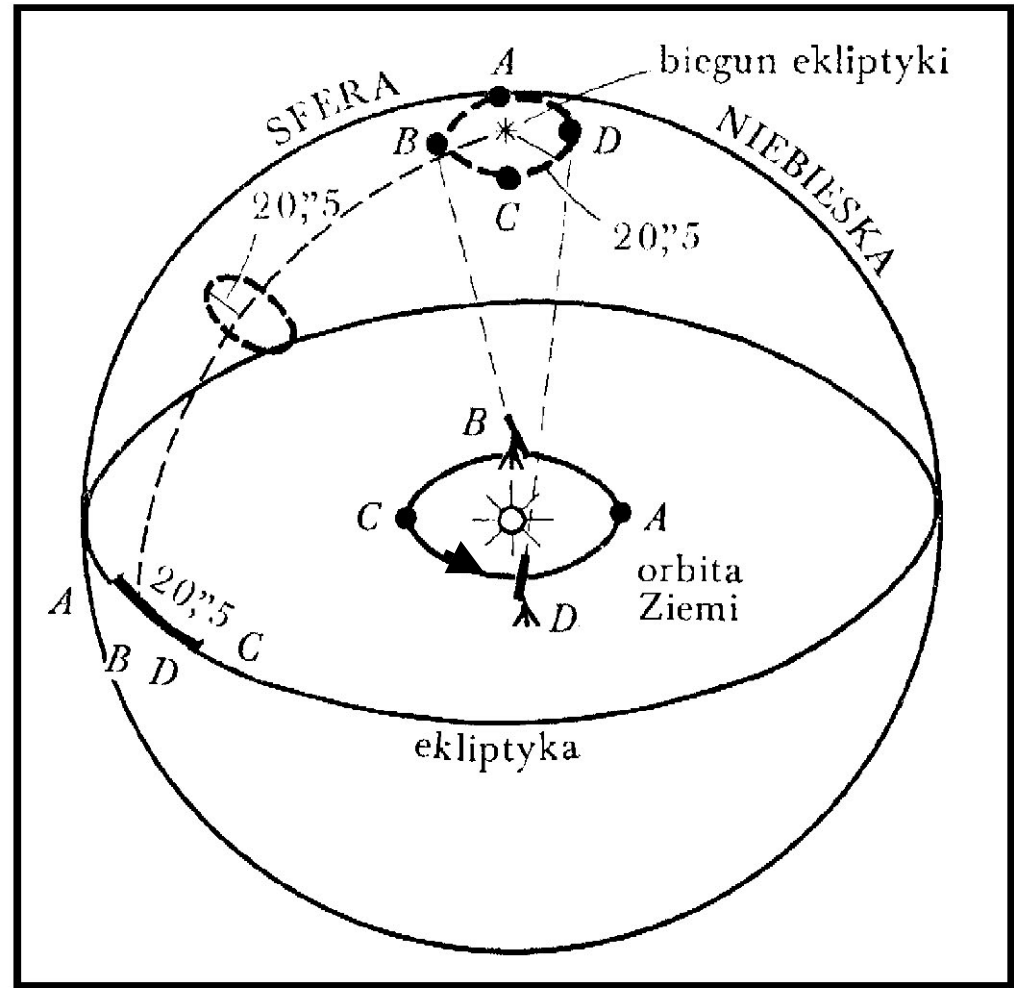
Rozpatrując gwiazdę w pobliżu bieguna ekliptyki Bradley oczekiwał, że zaobserwuje, że zatacza ona na niebie elipsę. Obserwowana gwiazda, γ Smoka, rzeczywiście zakreślała na niebie małą elipsę ale orientacja jej osi nie zgadzała się z oczekiwaniami.

Orbita Ziemi jest niemal kołem. Przepuścmy jednak, że duża półość orbity Ziemi a to odcinek $AC/2$, zaś mała półość b to odcinek $BD/2$.

Oczekiwalibyśmy, że gwiazda w biegunie ekliptyki odległa o D będzie zakreślać elipsę o rozmiarach kątowych a/D i b/D . Zaobserwowana elipsa (czerwona) była obrócona.



Aberracja gwiazd



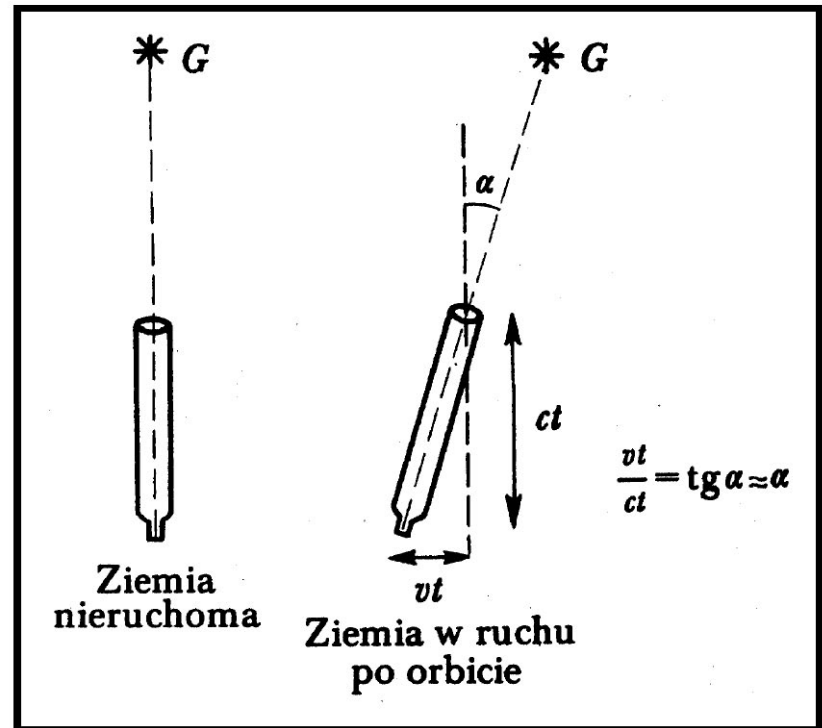
Wyjaśnienie: za dodatkową paralaksę odpowiedzialny jest ruch Ziemi i wektorowe dodawanie prędkości.

Na rysunku obok widać, że należy uwzględnić skończoną wartość prędkości światła i wektorowe dodawanie prędkości ruchu Ziemi i prędkości światła przychodzącego z gwiazdy, ustawiając teleskop pod określonym kątem.

Efekt ten prowadzi do dodatkowego ruchu rocznego po stożku o średnicy kątovej $2\alpha \approx 41''$. Bradley obliczył, że $c = 301000$ km/s. Podstawiając współczesne wartości otrzymamy $c = 299\,770$ (150) km/s.

Aberracja gwiazd cd.

Odkrywca:
William Bradley (1727)

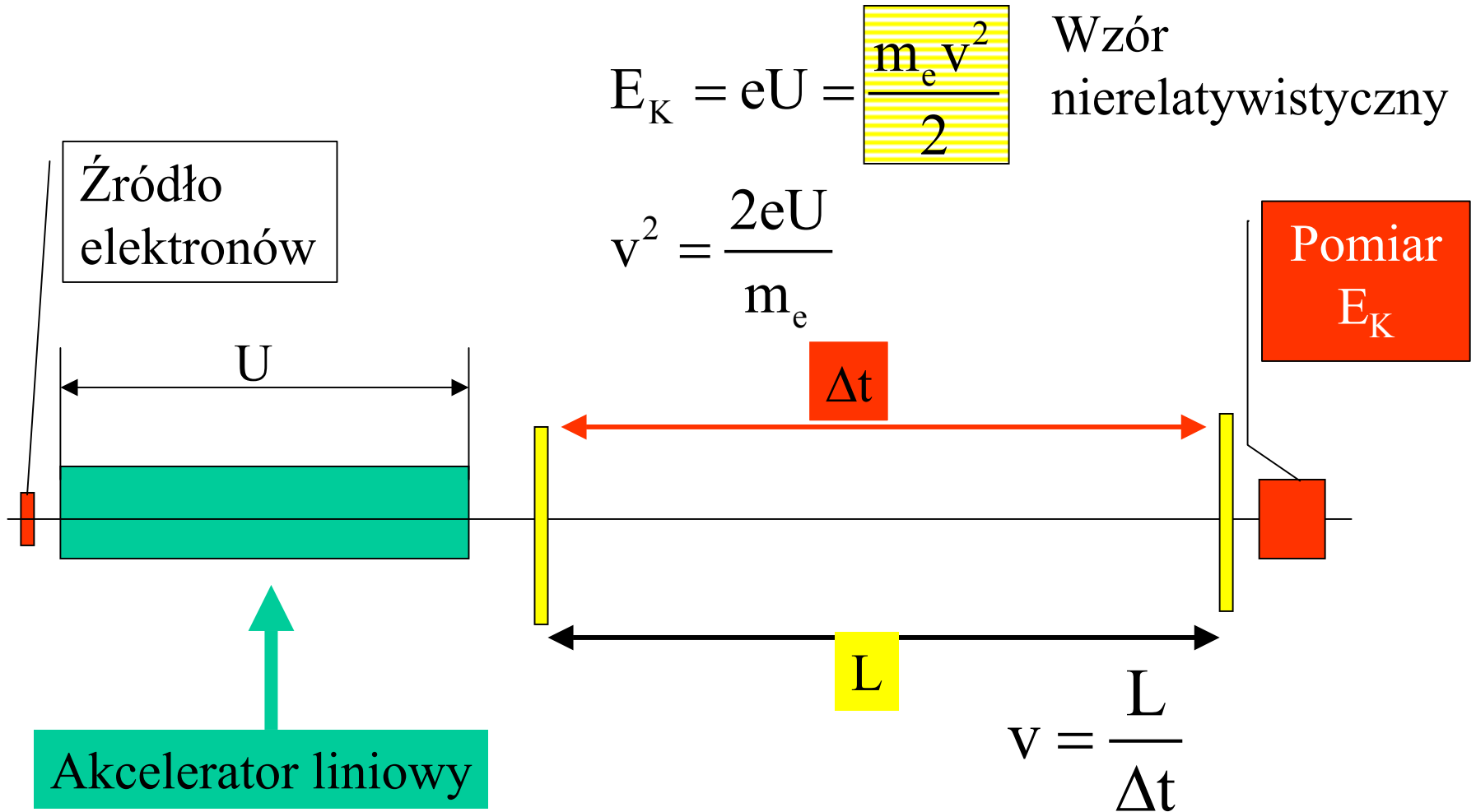


c jako prędkość graniczna

W prowadzonych dotychczas rozważaniach nie pojawiły się żadne ograniczenia na wartość prędkości. Np. w prostoliniowym ruchu jednostajnym przyspieszonym całkowanie przyspieszenia po odpowiednio długim czasie prowadziłoby do nieograniczonych wartości prędkości.

Można to sprawdzać doświadczalnie ale potrzebny do tego jest akcelerator cząstek zapewniający cząstkom stałe przyspieszenie np. akcelerator elektrostatyczny.

Idea doświadczenia



Typowe wyniki (Perry et.al.. 1930)

Dane doświadczalne
dowodzą, że:

- Obserwujemy prędkość graniczną = c ,
- Trzeba stosować relatywistyczny wzór na energię kinetyczną:

$$E_K = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - mc^2 = mc^2 (\gamma - 1)$$

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

