Metody měření rychlosti světla

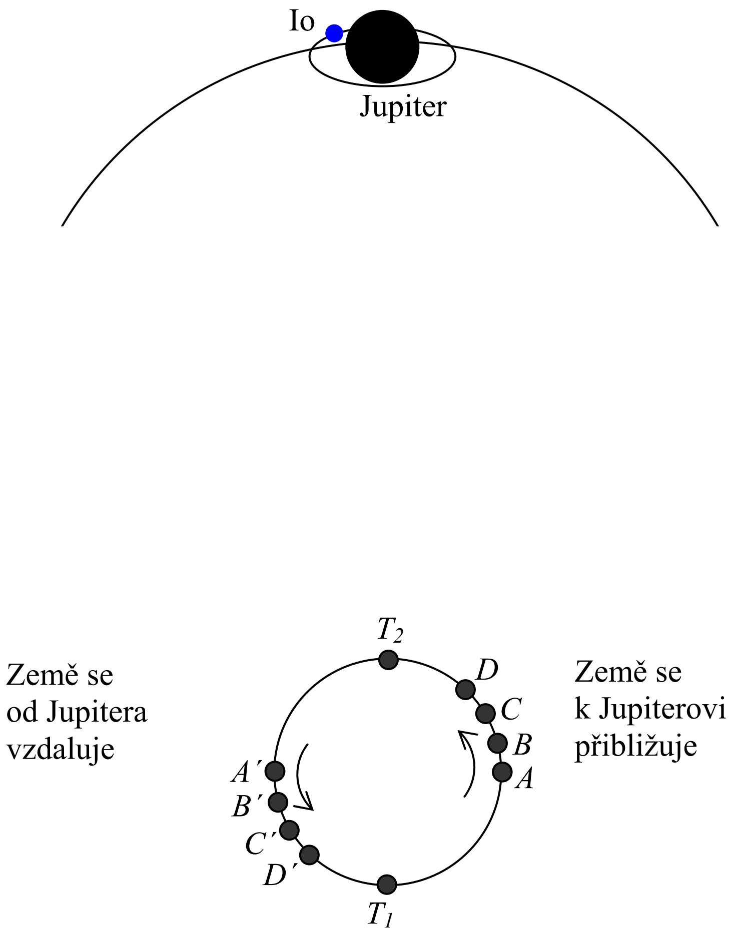
a) metody přímé

První (neúspěšný) pokus o změření rychlosti světla provedl **Galileo** s použitím dvou luceren s dvířky umístěných na dvou několik kilometrů vzdálených vršcích.

1. Roemerova metoda (Olaf Roemer, dánský astronom (1644-1710)

Na základě pozorování zatmění Jupiterova měsíce Io (oběžná doba ~ 42 hodin, zatmění je pozorovatelné při každém oběhu)

Dlouhodobá měření ukázala, že časový interval mezi dvěma po sobě následujícími zatměními je kratší, jestliže se Země k Jupiteru přibližuje, a delší jestliže se Země od Jupitera vzdaluje. Roemer správně usoudil, že příčinou těchto změn je měnící se vzdálenost mezi Zemí a Jupiterem.



Obr. 1. Roemerova metoda měření rychlosti světla.

$A, B, C, D, \ldots, A', B', C', D', \ldots$ body, kdy je pozorován počátek zatmění (viz obr. 1)

$A \to B$ kratší než střední interval mezi zatměními, $A' \to B'$ delší než střední interval mezi zatměními

τ - střední doba mezi následujícími zatměními $(\tau \approx 42 \text{ hodin})$ byla známa s dostatečnou přesností

Rozdíly mezi následujícími zatměními jsou malé, avšak je možné změřit celkové zpoždění mezi body T_1 a T_2, kde $\overline{T_1T_2} = D$ (kde D je průměr zemské dráhy).

Nastane-li za půl roku *N*-krát zatmění, potom poslední by mělo nastat za dobu $(N-1)\tau$ po prvním. Ve skutečnosti je *N*-té zatmění pozorováno dříve o čas, který potřebuje paprsek k proběhnutí průměru zemské dráhy D

$$t = (N-1)\tau - \frac{D}{c} \qquad \text{při } T_1 \to T_2$$

a podobně v druhé polovině roku

$$t' = (N-1)\tau + \frac{D}{c} \qquad \text{při } T_2 \to T_1$$

Odtud

$$t' - t = \frac{2D}{c}$$

$$c = \frac{2D}{t' - t}$$

Roemer změřil $\frac{t'-t}{2} = 22 \text{ minut}$ a při tehdy známé hodnotě D potom vychází $c \approx 214\ 300 \text{ km/s}$. Důležitější než samotná hodnota byl fakt, že rychlost je sice vysoká, ale ***konečná***. Moderní hodnota s použitím stejné metody je $c = 299\ 840 \pm 60 \text{ km/s}$.

Alternativní postup dle Roemerovy metody:

Přibližování Země k Jupiteru

$$c.T_p = c.T - v.T_p \qquad \Rightarrow \qquad c.T = c.T_p + v.T_p$$

vzdalování Země

$$c.T_v = c.T + v.T_v \qquad \Rightarrow \qquad c.T = c.T_v - v.T_v$$

kde T je skutečná doba zatmění, T_p zdánlivá do zatmění při přibližování Země, T_v zdánlivá doba zatmění při vzdalování Země, c rychlost světla a v rychlost Země (přibližně ve směru spojnice s Jupiterem). Z výše uvedených vztahů výše můžeme vyjádřit skutečnou dobu zatmění T

$$T = \frac{T_v - T_p}{2}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \approx \frac{T_v - T_p}{2}$$

nebo rychlost světla

$$c = \frac{T_v + T_p}{T_v - T_p} \quad .$$

Vezmeme-li do úvahy i stálou složku rychlosti Jupitera ve směru spojnice obou planet u, dostaneme

$$c.T_p = (c - u).T - v.T_p$$

a

$$c.T_v = (c - u).T + v.T_v$$

dostaneme stejný vztah pro rychlost světla jako výše, ale jiný vztah pro skutečnou dobu zatmění

$$T = \frac{c}{c - u}\frac{T_v - T_p}{2}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

2. Fizeauova metoda

Jde o první úspěšné ***přímé*** měření rychlosti světla v pozemských podmínkách (metoda rotujícího ozubeného kola).

Rotující ozubené kolo (N zubů a N mezer) slouží jako přerušovač, který generuje světelné pulzy o časové šířce τ

$$\tau = \frac{T}{2N} = \frac{1}{2Nf}$$

kde T a f jsou perioda a frekvence otáčení kola.

Hledaly se takové podmínky, při kterých nastane první zatmění (viz obr. 3), tedy

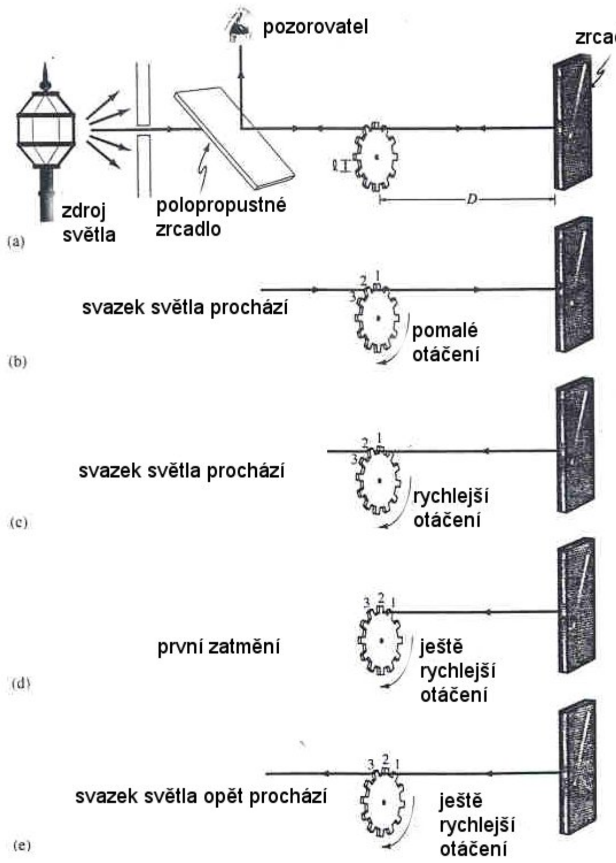
$$\tau = \Delta t \quad .$$

Ovšem

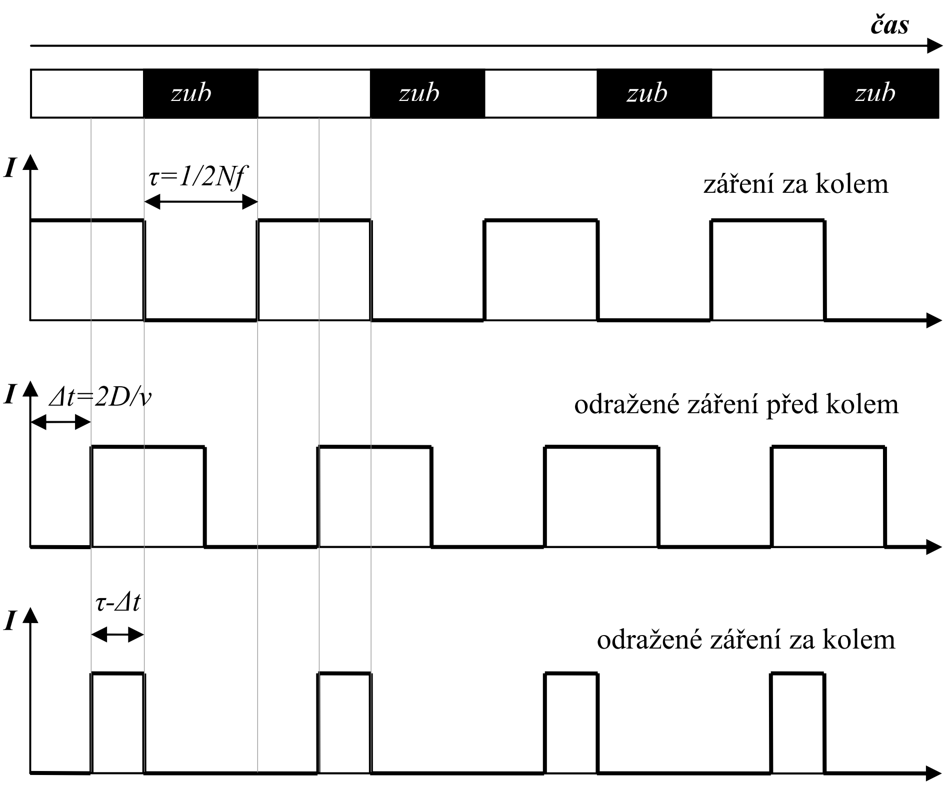
$$\Delta t = \frac{2D}{c} \quad ,$$

kde D je vzdálenost mezi ozubeným kolem a zrcadlem, a tedy

$$c = 4DNf \quad .$$



Obr. 2. Fizeauova metoda měření rychlosti světla s užitím rotujícího ozubeného kola.



Obr. 3. Časový průběh intenzity v různých místech při Fizeauově metodě měření rychlosti světla.

Ve Fizeauově experimentu bylo $N = 720$, $f = 12{,}6$ Hz, $D = 8\ 633$ m. Pro rychlost světla potom dostáváme $c = 3{,}13.10^8$ m/s.

3. Foucaultova metoda rotujícího zrcadla

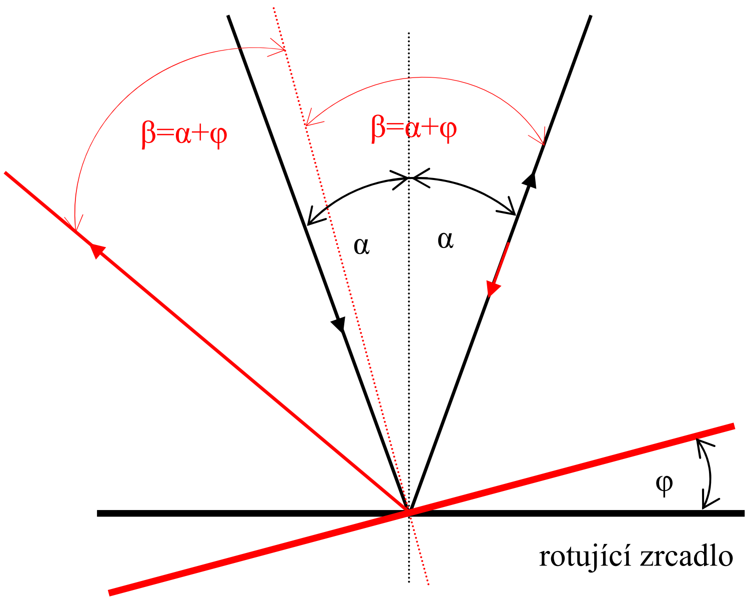
Foucault nahradil rotující ozubené kolo rotujícím rovinným zrcadlem (viz obr. 5).
Nehybné zrcadlo ⇒ obraz zdroje v bodě S_1,rotující zrcadlo ⇒ obraz zdroje se posune do bodu S_1'. Označme vzdálenost $\overline{S_1S_1'} = b$. Doba potřebná k proběhnutí dráhy $2D$ od rotujícího zrcadla k zrcadlu nepohyblivému a zpět bude

$$t = \frac{2D}{c}$$

Za tuto dobu se zrcadlo otočí o úhel

$$\varphi = 2\pi ft = \frac{4\pi fD}{c}$$

kde f je frekvence otáčení. Protože svazek odražený od rotujícího zrcadla je pootočen o úhel 2φ (viz obr. 4), bude obraz zdroje posunut o



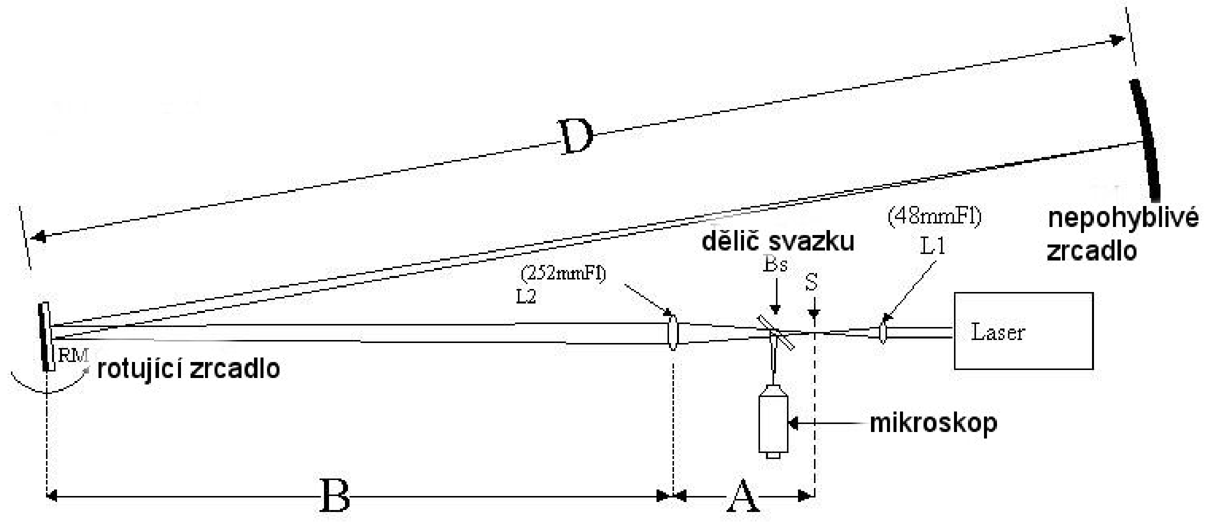
Obr. 4. K Foucaltově metodě rotujícího zrcadla.

$$b = 2\varphi A$$

a tedy

$$c = \frac{8\pi fDA}{b} \ .$$

Foucault dospěl k hodnotě $c = (2{,}980 \pm 0{,}005)10^8$ m/s.



Obr. 5. Zmodernizovaná varianta Foucaltovy metody měření rychlosti světla, kterou lze poměrně snadno zrealizovat v rámci fyzikálního praktika. L1 a L2 jsou čočky.

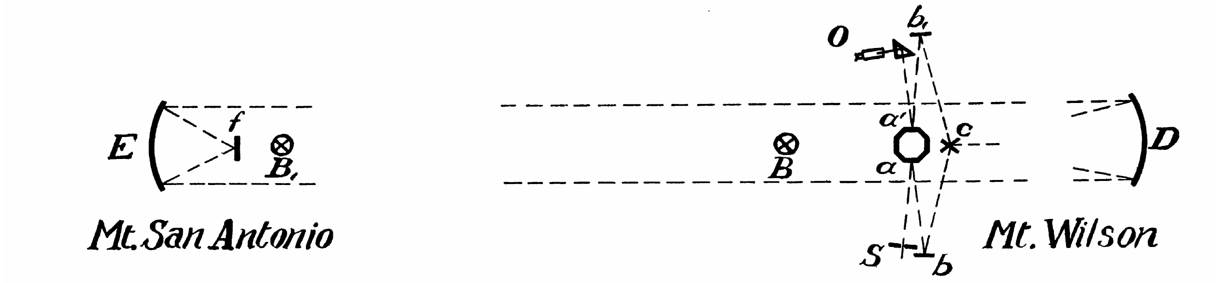
V původním měření bylo $D = 20$ m, v dalších experimentech Foucault zkrátil dráhu D až na 4m (a samozřejmě úměrně tomu zvýšil rychlost otáčení), což mu umožnilo změřit rychlost světla ve vodě a experimentálně prokázat, že je menší než rychlost světla ve vzdychu. Tento výsledek byl v souladu s vlnovou teorií světla a přispěl k jejímu potvrzení vlnové.

4. Michelsonova měření (modifikovaná Foucaultova metoda)

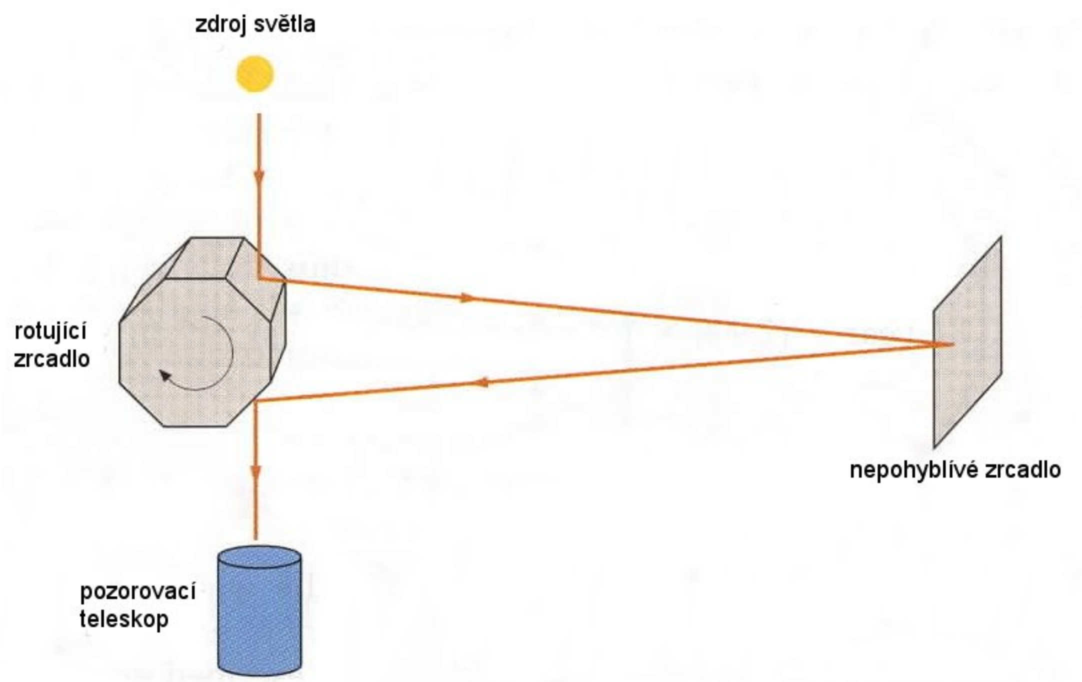
Poprvé 1876, nakonec v roce 1926 na Mt. Wilson, na vzdálenosti 35 km

$$c = (2{,}99796 \pm 0{,}00004)10^8 \text{ m/s}$$

a posléze i v 1 míli dlouhé evakuované rouře $c = (2{,}99774 \pm 0{,}00011)10^8$ m/s



Obr. 6. Obrázek převzatý z původní Michelsonovy publikace v Astrophysical Journal **65** 1-14 (1927).



Obr. 7. Schéma uspořádání při Michelsonově měření rychlosti světla.

5. Metoda Karolusova-Mittelstaedtova (1929) s použitím Kerrovy cely

Na dvě Kerrovy cely přichází synchronně proměnný rozdíl potenciálů s frekvencí f. Obe cely jsou umístěny mezi zkříženými polarizačními hranoly (Nikolův hranol). Světlo prochází soustavou složenou z Kerrovy cely a dvou nikolů tehdy, když na desky článků přiložíme napětí. Světlo propuštěné soustavou s celou K_1 dopadá na zrcadlo Z, odrazí se a dopadá na druhou soustavu s celou K_2. Jestliže za dobu t, za kterou přišlo světlo od cely K_1 k zrcadlu Z a k cele K_2, klesne přiložené napětí na nulu, nepropustí poslední nikol světlo. Dobu t určíme ze známé frekvence f a známe-li vzdálenost, kterou světlo urazilo, můžeme vypočítat rychlost světla. Touto metodou byla získána hodnota $c = (2{,}99778 \pm 0{,}00020)10^8$ m/s.

6. Andersenova metoda (1940) – zmodernizovaná Fizeauova metoda s použitím Kerrovy cely

Světelný svazek ze zdroje je přerušován Kerrovou celou připojenou k oscilačnímu obvodu. Cela propouští řadu pulzů délky l, které jsou rozděleny na děliči (polopropustném zrcadle) C. Kratší cestou jde k zrcadlu D, delší cestou k zrcadlům E, F, G, H a zpět k C, odtud se odráží k detektoru. Je-li a dráha od C k H a b dráha od C k D, potom oba pulsy přicházejí s opačnou fází (tj. na detegujeme nejmenší signál), pokud $2(a-b)$ je lichým násobkem l. Je-li frekvence oscilátoru f, potom

$$l = \frac{c}{2f}$$

a minima nastávají, jestliže

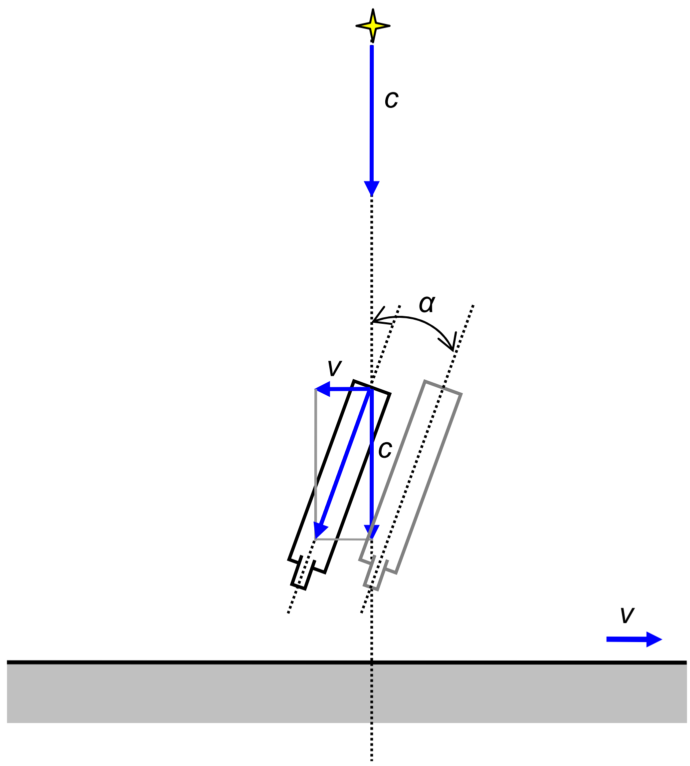
$$2(a-b) = (2k-1)\frac{c}{2f}$$

Poněvadž rychlost světla je dostatečně známa, je možné vypočítat k a zaokrouhlit ho na nejbližší celé číslo. Pomocí vztahu výše potom určíme přesněji hodnotu c. Anderson dospěl k hodnotě $c = (2{,}99776 \pm 0{,}00014)10^8$ m/s.

b) metody nepřímé

1. Metoda Bradleyova (1728)

Stálice pozorované kolmo ke směru oběžného pohybu Země kolem Slunce se zdají být vychýleny ve směru pohybu Země o tzv. aberační úhel (obr. 8).



Obr. 8. Vznik aberace stálic.

Za dobu t šíření paprsku od objektivu k okuláru, za kterou paprsek urazí dráhu ct, se posune dalekohled se Zemí o dráhu $d = vt$. Proto musíme dalekohled sklonit o aberační úhel α tak, aby světlo dopadlo do středu ohniskové roviny okuláru.

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{vt}{ct} = \frac{v}{c}$$

kde v je průměrná rychlost pohybu Země, $v = 29{,}7$ km/h.

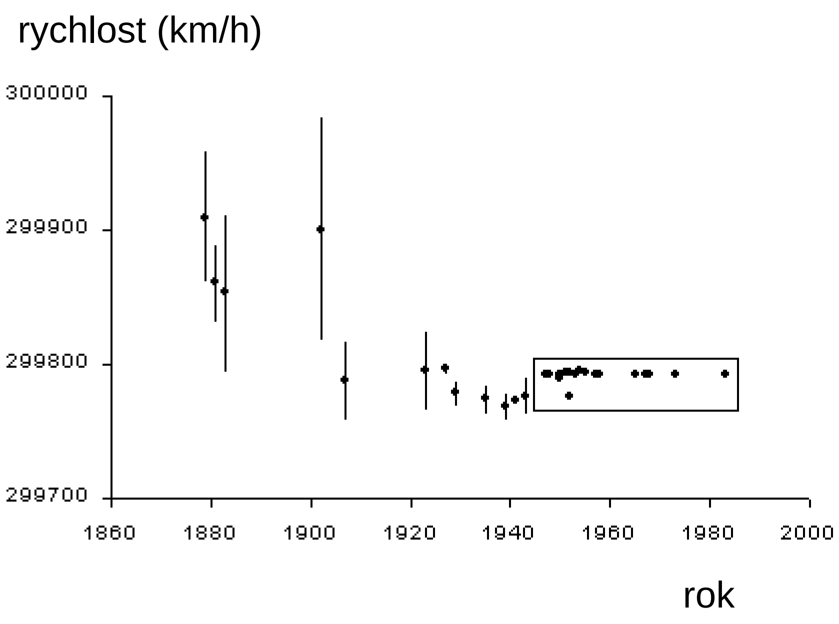
Ze změřené hodnoty aberační konstanty $\alpha = 20{,}48''$ dospěl Bradley k hodnotě

$c = 2{,}95.10^8$ m/s, moderní hodnota dle této metody je $c = \left(2{,}99857 \pm 0{,}0012\right)10^8$ m/s.

2. metody založené na elektromagnetické teorii a čistě elektrostatických a magnetostatických měřeních (měření kapacity), například Rosa a Dorsey (1930) takto získali hodnotu $c = \left(2{,}99784 \pm 0{,}0003\right)10^8$ m/s.

Platná přesná hodnota c jako fundamentální fyzikální konstanty

$$c = 2{,}99792458.10^8 \text{ m/s} \quad .$$



Obr. 9. Vývoj přesnosti určení rychlosti světla.

Kdy	Kdo	Kde	experimentální metoda	rychlost (10^8 m/s)	neurčitost (m/s)	relativní odchylka od skutečné *c*
1600	Galileo	Itálie	lucerna s dvířky	velká	?	
1676	Roemer	Francie	Jupiterův měsíc	2,14	?	28%
1729	Bradley	Anglie	aberace hvězd	3,08	?	2,70%
1849	Fizeau	Francie	ozubené kolo	3,14	?	4,70%
1879	Michelson	USA	rotující zrcadlo	2,9991	75000	400 z 10^6
	Michelson	USA	rotující zrcadlo	2,99798	22000	18 z 10^6
1950	Essen	Anglie	mikrovlnná dutina	2,997925	1000	0,1 z 10^6
1958	Froome	Anglie	interferometr	2,997925	100	0,1 z 10^6
1972	Evenson et al.	USA	laserová metoda	2,99792457	1,1	2 z 10^9
	Blaney et al.	Anglie	laserová metoda	2,99792459	0,6	3 z 10^9
	Woods et al.	Anglie	laserová metoda	2,99792459	0,2	3 z 10^9
1983		international		2,99792458	0,0	přesně

Tab. 1. Vývoj přesnosti určení rychlosti světla.

A úplně nakonec jedna zajímavost :-)

Finding the Speed of Light with Marshmallows—A Take-Home Lab

Robert H. Stauffer, Jr.
Cimarron-Memorial High School, Las Vegas, NV 89128;
Robert_H._Stauffer@aspen.interact.k12.nv.us

I have heard that at 16 years old Albert Einstein constantly wondered what it would be like to ride on a beam of light. Students in physics always seem to be fascinated by the properties of light. However, speed-of-light demonstrations often require extensive preparation or expensive equipment. I have prepared a simple classroom demonstration that the students can also do as a take-home lab.

The activity requires a microwave oven, a microwave-safe casserole dish, a bag of marshmallows, and a ruler. (The oven must be of the type that has no mechanical motion—no turntable or rotating mirror. If there is a turntable, remove it.) First, open the marshmallows and place them in the casserole dish, completely covering it with a layer one marshmallow thick. Next, put the dish of marshmallows in the microwave and cook on low heat. Microwaves do not cook evenly and the marshmallows will begin to melt at the hottest spots in the microwave. (I learned this from our Food Science teacher Anita Cornwall.) Heat the marshmallows until they begin to melt in four or five different spots. Remove the dish from the microwave and observe the melted spots. Take the ruler and measure the distance between the melted spots. You will soon find that one distance repeats over and over. This distance will correspond to the wavelength of the microwave, about 12 cm. Now, turn the oven around and look for a small sign that gives you the frequency of the microwave. Most commercial microwaves operate at 2450 MHz.

Physics student Mia Youhne measures the distance between melted spots and calculates the speed of light. (Photo by Ashley Miller.)

All you have to do now is multiply the frequency by the wavelength. The product is the speed of light.

Example:

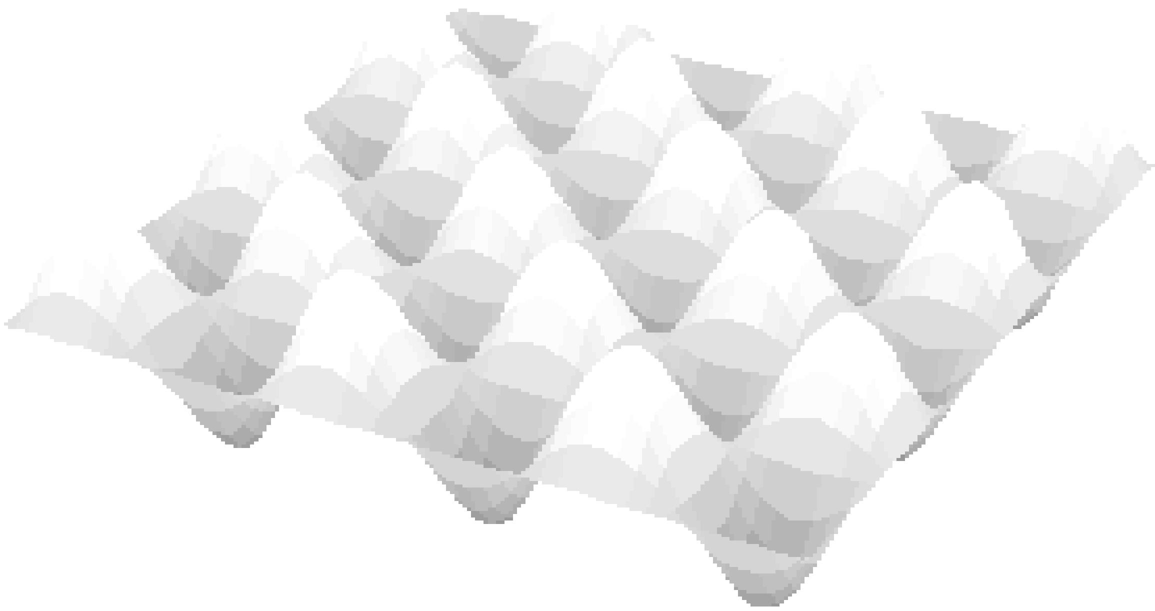
Velocity = Frequency × Wavelength

Velocity = 2450 MHz × 0.122 m

Velocity = 2.99×10^8 m/s

This works in my physics class, often with less than 5% error. Then the students can eat the marshmallows.

Marshmallows jsou něco jako velké bílé žužu bonbóny.



Obr. 10. Model rozložení maxim a minim ve vrstvě žužu, které vzniknou ve výše zmiňovaném pokusu.