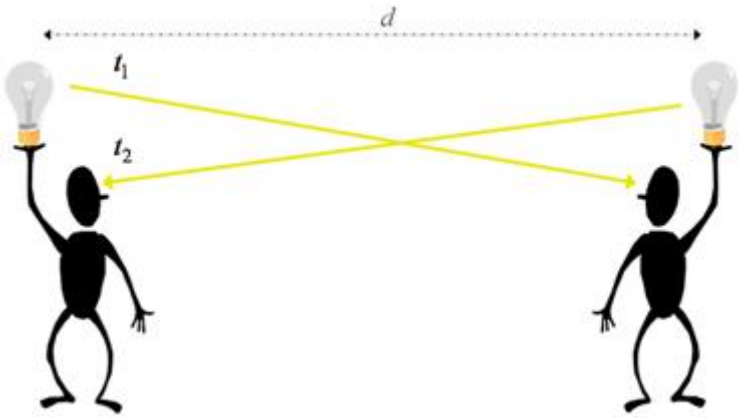
Měření velikosti rychlosti světla

Jedno z prvních měření velikosti rychlosti světla navrhl už italský učenec Galileo Galilei (1564 - 1642). Navrhoval použít dva pozorovatele, kteří budou mít každý svůj zdroj světla. V určitém čase t_1 první pozorovatel rozsvítí svůj zdroj světla. Jakmile tento signál zaznamená druhý pozorovatel, rozsvítí svůj zdroj světla. Informaci o rozsvíceném zdroji světla kolegy pak zaznamená první pozorovatel v čase t_2 (schematicky zobrazuje tuto metodu měření obr. 2). Na základě znalosti vzdálenosti *d* obou pozorovatelů a časového rozdílu $t_2 - t_1$ lze velikost rychlosti světla *c* určit již snadno: $c = \frac{d}{t_2 - t_1}$.



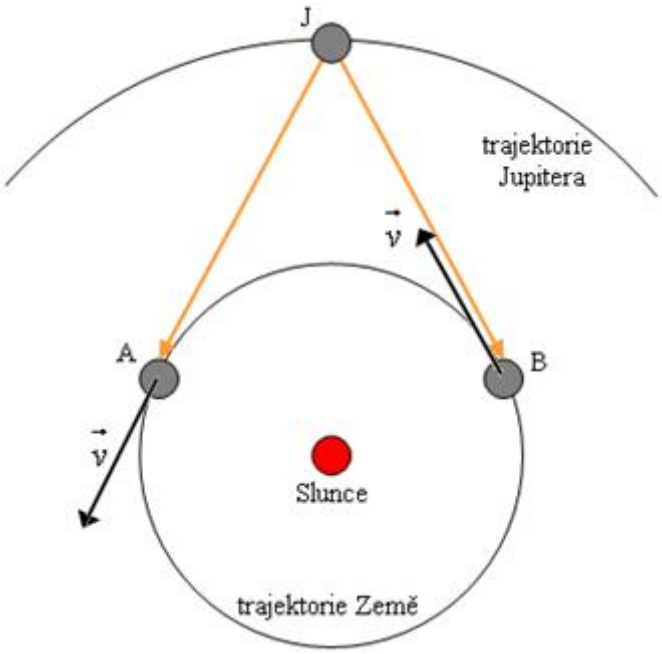
Obr. 2

Metoda navržená Galileim byla velmi nepřesná z řady důvodů (byla by zapotřebí velká vzdálenost *d* obou pozorovatelů, nepřesné určování časových okamžiků spatření a následného rozsvícení zdroje světla, vliv reakční doby obou pozorovatelů, ...) a je sporné, zda jí vůbec Galileo Galilei realizoval.

V roce 1675 dánský astronom Olaf Christensen Römer (1644 - 1710) na základě astronomických pozorování zákrytů Jupiterových měsíců Jupiterem zjistil, že velikost rychlosti šíření světla je konečná. Dráha světla vycházejícího z Jupitera a dopadajícího na Zem v bodě *A* její trajektorie je delší, než dráha, kterou urazí světlo z Jupitera na Zem v bodě *B* její trajektorie. Je-li Země v bodě *A* své trajektorie, vzdaluje se od Jupitera rychlostí $\vec{v}$, zatímco v bodě *B* se k němu toutéž rychlostí přibližuje (viz obr. 3).

Jupiter sám světlo nevysílá, pouze odráží světlo, které na něj dopadá ze Slunce. Formulace v předchozím odstavci je ale jednodušší.

Velikost rychlosti, kterou se pohybuje Země kolem Slunce, není na celé její trajektorii konstantní; tato hodnota se mění v souladu s druhým Keplerovým zákonem. Vzhledem k tomu, že elipsa, po níž obíhá Země kolem Slunce, má velmi malou excentricitu, je rozdíl ve velikostech rychlostí pohybu Země v různých bodech její trajektorie minimální.



Obr. 3

Vzhledem k tomu, že velikost rychlosti šíření světla je konečná, je čas t_1 měřený na Zemi v bodě *A* mezi dvěma po sobě jdoucími zatměními měsíčků Jupitera větší než čas t_2 měřený na Zemi v bodě *B*.

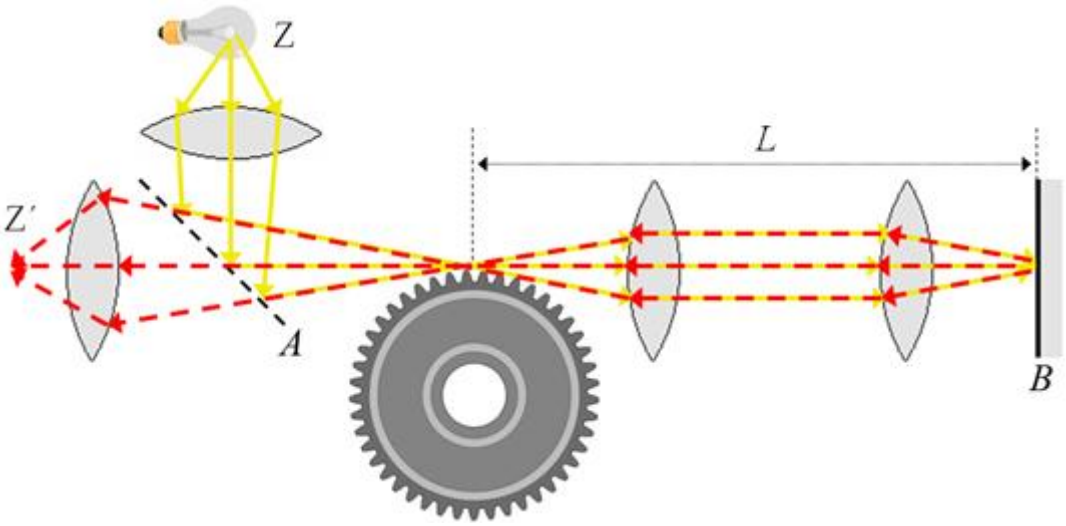
Kdyby byla Země v klidu, naměřili bychom v obou případech stejný čas.

Můžeme tedy psát $t_1(c-v)=t_2(c+v)$, odkud pro velikost rychlosti světla *c* ve vakuu dostáváme: $c=\frac{t_1+t_2}{t_1-t_2}v$. Na základě svých měření dospěl Römer k hodnotě $c=215000\ \mathrm{km.s^{-1}}$.

Otázkou měření velikosti rychlosti světla se zabývali rovněž fyzikové druhé poloviny 19. století. V roce 1849 uskutečnil první měření velikosti rychlosti světla v pozemských podmínkách francouzský fyzik Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819- 1896). Velikost rychlosti světla měřil pomocí rotujícího ozubeného kotouče (viz obr. 4).

Světelný paprsek vyslaný ze zdroje *Z* byl po odrazu od polopropustného zrcadla *A* přerušován rotujícím ozubeným kolem se 720 zuby. Světelný paprsek, který prošel mezi zuby ozubeného kola, dopadl na zrcadlo *B*, od nějž se odrazil. Do oka pozorovatele v bodě Z' se světelný paprsek dostal jen tehdy, pokud při zpáteční prošel další štěrbinou mezi dvěma zuby rotujícího ozubeného kola. První vymizení odraženého světelného paprsku od začátku experimentu nastane v bodě Z' za čas $\Delta t=\frac{1}{2nf}$, kde *n* je počet zubů rotujícího ozubeného kola a *f* je frekvence otáčení kola. Za tento čas urazí světlo dráhu 2*L* (k zrcadlu *B* a zpět), takže $\Delta t=\frac{2L}{c}$. Proto $\frac{1}{2nf}=\frac{2L}{c}$ a tedy $c=4Lnf$.

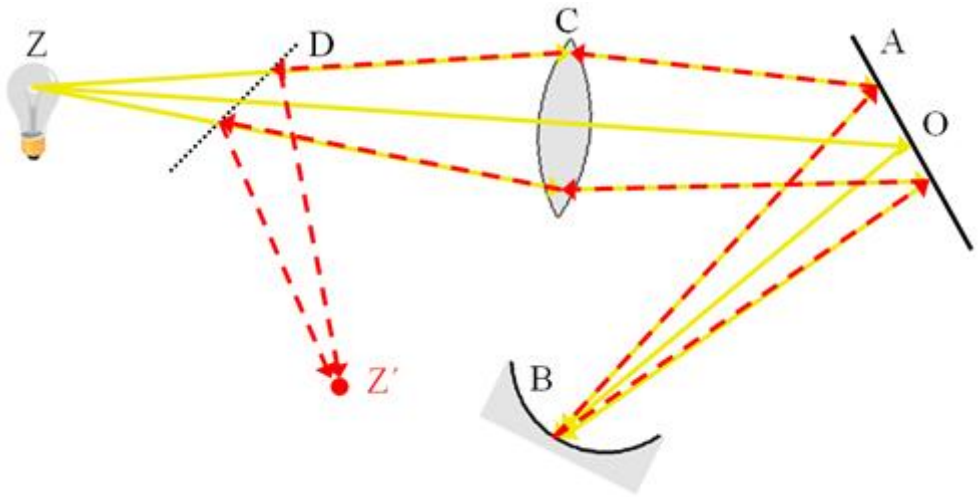
Vzdálenost *L* byla výrazně větší než vzdálenost zdroje světla od rotujícího kola resp. vzdálenost pozorovatele od rotujícího kola.



Obr. 4

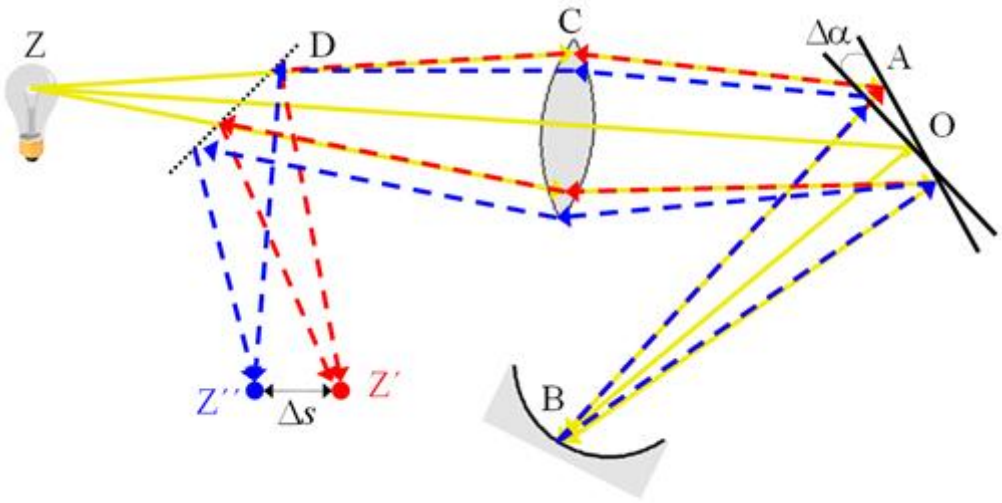
V roce 1850 provedl další měření velikosti rychlosti světla francouzský fyzik Jean Bernard Léon Foucault (1819 - 1868) pomocí rotujícího zrcadla. Původně spolupracoval s Fizeauem na jeho metodě měření, ale posléze vyvinul vlastní aparaturu.

Světlo ze zdroje *Z* projde polopropustným zrcadlem *D* a dopadá na zrcadlo *A*, které rotuje kolem osy *O* kolmé na rovinu obr. 5. Po odraze od zrcadla *A* dopadá světelný paprsek na duté zrcadlo *B*, které má střed křivosti v bodě *O*. Po odraze od tohoto zrcadla se světelný paprsek vrací zpět a zobrazí zdroj v bodě Z' .



Obr. 5

Při vysoké frekvenci otáčení zrcadla *A* se toto zrcadlo pootočí o úhel $\Delta\alpha$ za čas Δt, který potřebuje světelný paprsek k uražení dráhy od *A* do *B* a zpět. Přitom se odražený paprsek odchýlí o úhel $2\Delta\alpha$ (viz obr. 6, který není nakreslen ve správném měřítku).

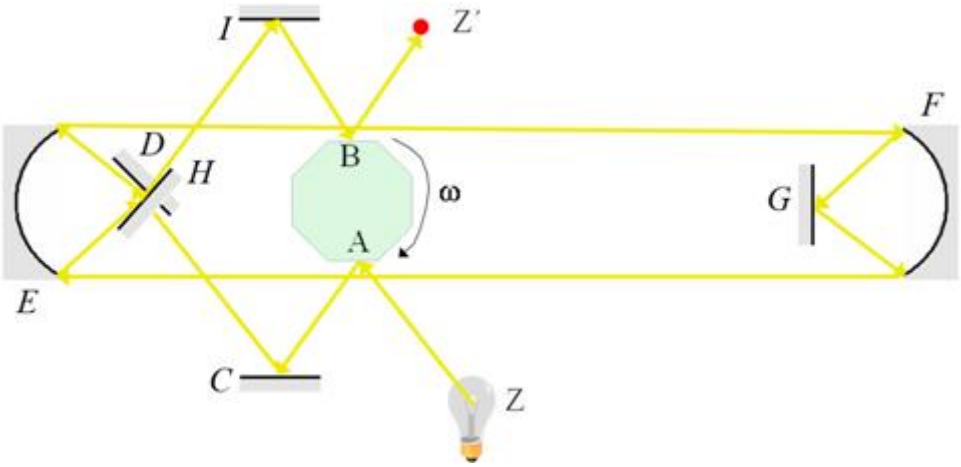


Obr. 6

Označíme-li vzdálenost zrcadel *A* a *B* symbolem L_2, můžeme psát: $\Delta t = \frac{2L_2}{c}$. Obraz Z' se v důsledku otočení zrcadla *A* posune do polohy Z'' o vzdálenost $\Delta s = 2\Delta\alpha L_1$, kde L_1 je vzdálenost od čočky *C* k zrcadlu *D* a dále k obrazu Z''. Současně platí $\Delta\alpha = \omega\Delta t$, kde ω je úhlová rychlost otáčení zrcadla *A*. Po dosazení dostaneme $\Delta\alpha = \omega\Delta t = \frac{2\omega L_2}{c}$. Po dosazení do vztahu $\Delta s = 2\Delta\alpha L_1$ dostaneme $\Delta s = \frac{4\omega L_1 L_2}{c}$ a tedy $c = \frac{4\omega L_1 L_2}{\Delta s}$.

V roce 1877 měřil velikost rychlosti světla i americký fyzik Albert Abraham Michelson (1852 - 1931). Použil rotující hranol, od kterého se odrážel světelný paprsek (viz obr. 7).

Světlo ze zdroje *Z* se odráží od stěny *A* ocelového osmibokého hranolu. Pomocí rovinných zrcadel *C* a *D* je světelný paprsek přesměrován na duté zrcadlo *E*, odkud pokračuje ke vzdáleným zrcadlům *F* a *G*. Po odraze od těchto zrcadel se vrací zpět k zrcadlu *E* a pomocí rovinných zrcadel *H* a *I* je veden znovu na rotující hranol. Po odraze od stěny *B* už vzniká obraz Z' zdroje *Z*. Kdyby byl hranol v klidu, byla by stěna *B* protilehlá ke stěně *A*. Jestli se hranol otočí o $45°$ za čas, který potřebuje světelný paprsek k překonání vzdálenosti mezi body *A* a *B* (po lomené čáře vedoucí přes zrcadla *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H* a *I*), zůstane obraz Z' na svém místě. Je-li tento čas jiný, obraz Z' zdroje *Z* se posune.



Obr. 7

Touto metodou naměřil Michelson velikost rychlosti světla $300092\ \mathrm{km.s^{-1}}$. Při opakování tohoto experimentu v roce 1932 (tedy po Michelsonově smrti) byla naměřena velikost rychlosti $299774\ \mathrm{km.s^{-1}}$.

V souvislosti s měřením velikosti rychlosti světla vyvstal u všech experimentů prováděných v 19. století problém: Vůči které soustavě měříme velikost rychlosti světla?

© Encyklopedie Fyziky (http://fyzika.jreichl.com); Jaroslav Reichl, Martin Všetička
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.