

# Měření rychlosti světla

O. Mikuláš\*, J. Konečný\*\*

ČVUT FJFI, Břehová 7, 115 19 Praha 1

\*mikulon2@fjfi.cvut.cz, \*\*konecja3@fjfi.cvut.cz

## Abstrakt

V tomto příspěvku vás seznámíme s měřením rychlosti světla, které jsme uskutečnili v rámci fyzikálního semináře. K tomuto měření jsme použili Foucaultovu metodu. Rychlost světla se nám podařilo změřit se střední kvadratickou chybou menší než jedno procento.

## 1 Úvod

Rychlost světla je jednou ze základních konstant přírody. Na její hodnotě závisí prostorovočasové transformace, používané ve speciální teorii relativity, velikost Coulombovy i magnetické síly. Tato rychlost podle postulátu STR i měření nezávisí na směru, v němž se pohybuje zdroj světla ani měřící zařízení resp. pozorovatel.

Od roku 1973 je rychlost světla stanovena mezinárodní dohodou na  $299792458 \text{ ms}^{-1}$  a od roku 1982 je pomocí ní definována délka metru<sup>1</sup>. My jsme se rozhodli změřit rychlost světla ve vzduchu a to co možná nejpřesněji. Použili jsme k tomu aparaturu PASCO Speed Of Light Apparatus, která je založena na Foucaultově metodě.

## 2 Foucaultova metoda

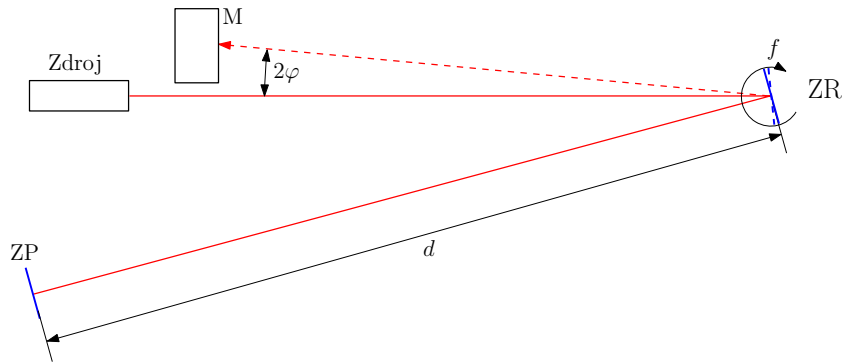
Tato metoda byla poprvé úspěšně použita pro měření rychlosti světla v roce 1862 francouzským fyzikem Jeanem Foucaultem. Pro lepší pochopení Foucaultovy metody měření rychlosti světla je vhodné sledovat zároveň s textem obrázek 1. Světlo vychází ze zdroje. Pak paprsek dopadá na malé rotující zrcátko (v obrázku označeno jako ZR). Od něj se odrazí.

Jak zrcátko rotuje, v určitém okamžiku odrazí paprsek ze zdroje na pevné zrcadlo (ZP), umístěné tak, aby odrazilo paprsek přesně zpět na rotující zrcátko. Při cestě od rotujícího na pevné zrcátko a zpět paprsek musí urazit dráhu  $2d$ . Když paprsek z pevného zrcadla dopadne na rotující, odrazí se od něj směrem ke zdroji. Protože se zrcátko mezitím pootočilo o úhel  $\varphi$  oproti původní poloze, paprsek nepůjde stejným směrem jako na začátku cesty, ale odchýlí se od toho směru o úhel  $2\varphi$ .

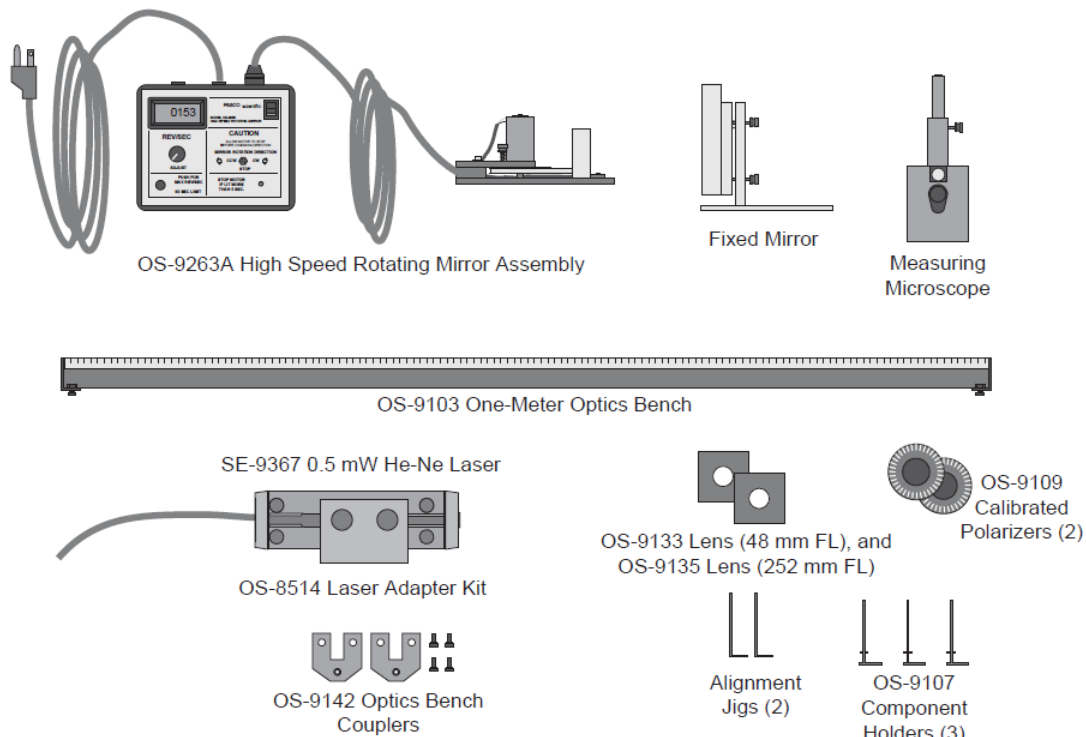
Tuto odchylku dokážeme měřit přístrojem M (například posuvným mikroskopem nebo na stínítku ve velké vzdálenosti) a určit z ní čas, který světlo „strávilo“ na cestě. Z tohoto času a vzdálenosti, kterou světlo urazilo, pak snadno vypočítáme rychlost světla.

---

<sup>1</sup>Tento časový odstup se může zdát paradoxní, ale organizace starající se o fyzikální jednotky k tomu jistě měly dobré důvody.



Obrázek 1: Schéma Foucaultovy metody

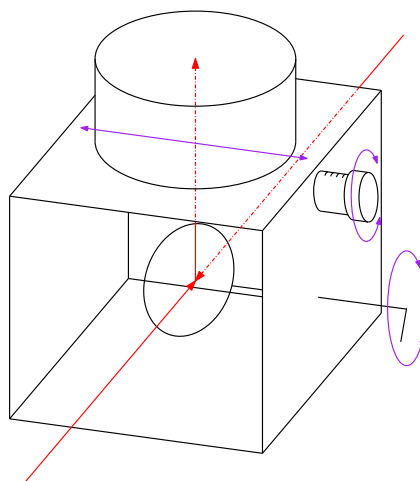


Obrázek 2: Součásti aparatury PASCO Speed Of Light Aparatus

### 3 Popis aparatury

Aparatura firmy PASCO Scientifics pro měření rychlosti světla sestává ze součástí vyobrazených na obrázku 2. Součásti (s výjimkou pevného zrcadla ZP) se dají magnety připevnit k lavici. To je vhodné proto, aby se komponenty vůči sobě nemohly pohybovat a abychom dorazem na kraji lavice mohli určit optickou osu.

Zdrojem světla je He-Ne laser červené barvy ( $\lambda = 632,8 \mu\text{m}$ ). Rotující zrcátko (ZR) je zpřevodovaně poháněno elektromotorkem, otáčky je možno regulovat v rozmezí 0 až cca 1600 Hz a to v obou směrech. Pro sledování polohy paprsku používáme mikroskop s nitkovým křížem uvnitř, posuvný kolmo k paprsku (obr. 3) mikrometrickým šroubem. Pod mikroskopem, v jeho držáku, je umístěné otočné polopropustné zrcátko pod úhlem přibližně  $45^\circ$  vzhledem k ose. To odrazí navracející se paprsek do objektivu, který je kolmo na optickou osu soustavy. Paprsek by se v mikroskopu měl zobrazit jako jasný bod, který můžeme zaměřit do středu nitkového kříže.



Obrázek 3: Schéma pohyblivých částí měřicího mikroskopu

Z důvodu lepšího zobrazení paprsku obsahuje optická soustava navíc dvě spojné čočky a pevné zrcadlo (ZP) je ze stejných důvodů a z důvodu snadnějšího seřízení kulové – duté (poloměr křivosti 13,5 m). Dvojici polarizačních filtrů lze jejich vzájemným natočením zeslabit intenzitu světla laseru tak, abychom ho mohli bezpečně pozorovat v mikroskopu. Zbylé komponenty využijeme k sestavení a seřízení celé aparatury.

## 4 Postup měření

Při měření jsme sledovali trojici smysl otáčení zrcátka ZR, jeho frekvenci a posunutí obrazu paprsku v mikroskopu.

Pro zmenšení možných chyb jsme měření prováděli na různých vzdálenostech  $d$  mezi zrcadly ZP a ZR a také jsme se při měření střídali v pozorování výchylky paprsku a odečítání frekvence otáčení zrcátka. Snažili jsme se provést co možná nejvíc měření při zachování co největší pečlivosti. Měřili jsme 40 krát pro každou ze tří sad měření, jednu polovinu po směru hodinových ručiček a druhou proti. Celkem jsme tedy získali 120 trojic posunu obrazu paprsku v mikroskopu, frekvence a smyslu otáčení.

Měření jsme poprvé z důvodu jednoduššího sestavení provedli na vzdálenost  $d=2,03$  m a po získání zkušenosti se seřízením aparatury pak dvakrát na vzdálenosti 13,45 m.

Ze získaných hodnot jsme rychlost světla vypočítali podle vzorce 1, který je důkladně odvozen a vysvětlen v uživatelské příručce PASCO [3].

$$c = n \frac{8\pi AD^2(f_1 + f_2)}{(D + B)(s_1 - s_2)} \quad (1)$$

My jen popíšeme proměnné v něm vystupující:  $c$ : rychlost světla;  $n$ : index lomu vzduchu;  $A$ ,  $B$ ,  $D$ : konstanty závislé na sestavení aparatury;  $f_1$ ,  $f_2$ : frekvence otáčení zrcátka v jednom směru resp. v opačném směru;  $s_1$ ,  $s_2$ : posunutí obrazu v jednom směru, resp. v opačném směru.

## 5 Výsledky

Naměřené hodnoty z důvodu jejich velkého množství neuvádíme. V tomto dokumentu jsou shrnuty pouze výsledné vypočtené hodnoty pro jednotlivá měření a průměr ze všech

Měření	Rychlost světla [ $10^8 \text{ ms}^{-1}$ ]	Rychlost světla [ $c$ ]	Stř. kv. chyba [ $10^8 \text{ ms}^{-1}$ ]	Odchylka od $c$ [ $10^8 \text{ ms}^{-1}$ ]
2,03 m	2,8407	0,9475	0,060838	-0,15727
13,45 m	3,0963	1,0328	0,019560	0,09836
13,45 m	3,1050	1,0357	0,022216	0,10704
Celkem	3,0140	1,0054	0,022166	0,01604

Tabulka 1: Výsledky měření rychlosti světla

měření. U těchto hodnot pak uvádíme jejich střední kvadratickou chybu a odchylku od  $c$ . Tyto hodnoty jsou v tabulce 1.

## 6 Diskuze výsledků

Jak můžeme vidět v tabulce, jednotlivá měření se od konstanty  $c$  liší o cca  $10^7 \text{ ms}^{-1}$  na obě strany. Pokud však vezmeme všechna měření dohromady a vypočítáme jejich aritmetický průměr, dostaneme odchylku od  $c$  o řád menší a to  $1,6 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$ , přičemž střední kvadratická chyba této skupiny dat je pak  $2,2 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$ . Jednotlivé sady měření mají střední kvadratickou chybu průměru v řádu  $10^7 \text{ ms}^{-1}$ . Také můžeme vidět, že měření na větší vzdálenosti mají výrazně menší střední kvadratickou chybu než měření na menší vzdálenosti.

## 7 Poděkování

Ing. Vojtěchu Svobodovi za umožnění vstupu do laboratoře a trpělivost při provádění experimentu.

Viktoru Löffelmannovi za morální podporu.

## Reference

- [1] I. Štoll, *Dějiny fyziky*, Prometheus Praha, 2009
- [2] I. Štoll, *Elektrina a magnetismus*, Nakladatelství ČVUT, Praha, 2003
- [3] B. Lee, *Speed of light apparatus*, [http://pasco.com/file\\_downloads/experiments/ex\\_99-22\\_files/speed\\_of\\_light.zip](http://pasco.com/file_downloads/experiments/ex_99-22_files/speed_of_light.zip)
- [4] kolektiv autorů, *Rychlost světla*, [http://cs.wikipedia.org/wiki/Rychlost\\_sv%C4%9Btla](http://cs.wikipedia.org/wiki/Rychlost_sv%C4%9Btla)
- [5] K. Sring, *Speed of light*, <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/lightandcolor/speedof-light.html>
- [6] M. Polyanskiy, *RefractiveIndex.INFO* <http://refractiveindex.info/?group=GASES-&material=Air>