



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

MĚŘENÍ RYCHLOSTI SVĚTLA

MEASURING THE SPEED OF LIGHT

FYO: PROJEKTOVÁ DOKUMENTACE

FYO: PROJECT DOCUMENTATION

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DAVID KOLEČKÁŘ

BRNO 2018

Abstrakt

Tato práce se zabývá způsoby měření rychlosti světla a rozděluje je do dvou základních skupin. Rychlost světla je důležitou vlastností ve fyzice, jelikož světlo je součástí řady elektromagnetických jevů. První skupinou jsou metody přímé, kde se vychází z definice rychlosti jakožto podílu dráhy a času. Zatímco druhou skupinou jsou metody nepřímé, u kterých se měří veličiny, které jsou v jistém vztahu k rychlosti světla. V závěru práce je uvedena souhrnná tabulka s jednotlivými badateli a jejich naměřenými hodnotami.

Klíčová slova

Rychlost světla, světlo, optické prostředí, Galile, Roemer, Fizeau, Foucault, Bradley, šíření světla

Citace

KOLEČKÁŘ, David. *Měření rychlosti světla*. Brno, 2018. FYO: Projektová dokumentace. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií.

Obsah

1	Úvod	3
1.1	Optické prostředí	3
1.2	Využití v IT	3
2	Metody přímé	4
2.1	Metoda navržená Galileiem	4
2.2	Roemerova metoda	4
2.3	Fizeauova metoda	5
2.4	Metoda Foucaultova	6
2.5	Metoda Karolusova-Mittelstaedtova	7
2.6	Metoda pomocí mikrovlnné trouby	7
2.7	Andersonova metoda	8
3	Metody nepřímé	9
3.1	Bradleyova metoda	9
3.2	Metoda Rosova-Dorseyova	9
4	Souhrnná tabulka	11
	Literatura	12

Kapitola 1

Úvod

Základní charakteristikou prostředí je rychlost světla. Tato rychlost představuje rychlost šíření elektromagnetického vlnění všech frekvencí ve vakuu. Zároveň je to i nejvyšší možná rychlost, jakou se může šířit jakýkoli signál. Podle speciální teorie relativity se větší rychlostí, než je rychlost světla, nemůže pohybovat žádné těleso. Od roku 1974 se pro rychlost světla ve vakuu, označována jako c , uvádí hodnota $2,99792458 \times 10^8$ m/s (často se používá přibližná hodnota 3×10^8 m/s). Označení písmenem c pochází zřejmě z latinského výrazu pro rychlost *celeritas*. V látkovém prostředí je rychlost světla v mikroskopickém popisu stejná jako ve vakuu, avšak světlo kvantově interaguje s částicemi látky, a proto se v makroskopickém popisu jeví jeho fázová rychlost pomalejší. Rychlost šíření světla je pak rovna vzorci 1.1, kde n je index lomu daného materiálu. [7]

$$v = \frac{c}{n} \quad (1.1)$$

1.1 Optické prostředí

Optické prostředí je prostředí, kterým se světlo šíří od světelného zdroje. Jestliže prostředí má ve svém objemu stejné optické vlastnosti, nazýváme ho homogenní neboli stejnorodé. Pokud rychlost šíření světla v daném prostředí nezávisí na směru (například sklo), jedná se o prostředí opticky izotropní. V opačném případě, pokud rychlost šíření světla závisí na směru šíření (například křemen), jedná se o prostředí opticky anizotropní. [4]

1.2 Využití v IT

Rychlost světla je důležitá v komunikaci, nejkratší možná doba na přenesení informace na druhou stranu země je teoreticky 0,067 sekundy. Čas odezvy (ping) mezi počítači je ale delší, jelikož dochází ke zpoždění v síťových přepínačích atd. V superpočítačích například rychlost světla omezuje přenos dat mezi procesory. Pokud procesor pracuje na frekvenci jednoho gigahertzu, může signál v jednom cyklu cestovat maximálně 30 centimetrů. Procesory tak musí být umístěny blízko sebe, aby se minimalizovala latence komunikace. [3]

Kapitola 2

Metody přímé

Tyto metody se při měření opírají o definici jakožto podílu dráhy a času. V minulosti byla rychlost světla z velké části jen otázkou dohadů, někteří zastávali názor, že světlo je něco, co se pohybuje a šíří mezi zemí a oblohou, aniž by jsme to mohli pozorovat. Naopak řecký filosof Aristotelés zastával názor, že světlo vyplývá z určité přítomnosti a je to statická hmota, která se nepohybuje. Další teorií bylo, že světlo je vyzařováno z oka, nikoliv z jiného zdroje do oka odráženo. Čímž vznikaly teorie, že rychlost světla je možná nekonečná. [5]

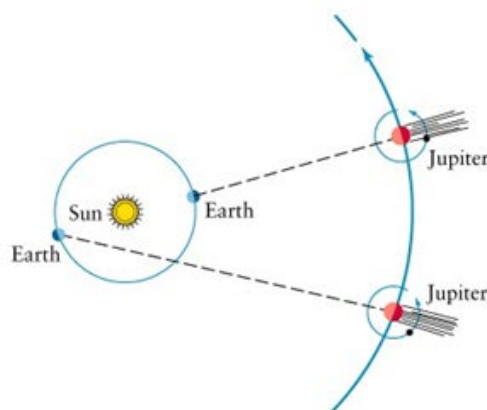
2.1 Metoda navržená Galileiem

V roce 1667 byly provedeny pokusy měření rychlosti světla dle metody, kterou navrhl Galileo Galilei. Na vrcholcích kopců vzdálených od sebe přibližně jeden a půl kilometru byli postaveni dva pozorovatelé. Pokus probíhal v noci, a každý pozorovatel měl lampu. První pozorovatel odkryl svou lampu a jakmile druhý pozorovatel zpozoroval světlo od kryl následně svou lampu. Rychlost světla se vypočítala ze známé vzdálenosti mezi lampami a z doby, která uběhla mezi okamžikem, kdy první pozorovatel odkryl svou lampu a kdy zpozoroval světlo z druhé lampy. Experiment to byl správný, avšak rychlost světla je příliš velká, abychom tak mohli přesně změřit časový interval.

2.2 Roemerova metoda

Dánský astronom Olaf Roemer v roce 1675 získal jasný důkaz, že světlo se šíří konečnou rychlostí a to na základě pozorování zatmění Jupiterova měsíce Io. Jupiter má celkem 12 měsíců, ale jen 4 jsou dostatečně velké, aby šli pozorovat průměrným dalekohledem. Roemer se zabýval měřením doby oběhu nejvnitřnějšího měsíce. 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 Jupiteru vzdaluje. Z toho správně vyvodil fakt, že příčinou je změna vzdálenosti mezi Zemí a Jupiterem (obrázek 2.1 tento případ znázorňuje).

Ze svých pozorování zjistil, že pro cestu světla po dráze rovnající se průměru zemské dráhy, je třeba doby přibližně 22 minut. Průměr zemské dráhy byl v Roemerově době udáván na hodnotu 172 000 000 mil. Z toho vyplývá, že rychlost světla by byla přibližně $2,1 \times 10^8$ m/s. Později se ukázalo, že zpoždění není 22 minut, ale přesněji 16 minut a 36 sekund.



Obrázek 2.1: Ilustrace Roemerovi metody

Ukázka výpočtu: Nastane-li za půl roku N -krát zatmění, potom poslední by mělo nastat za dobu $(N - 1)\tau$ po prvním. Kde τ je střední doba mezi následujícími zatměními, přibližně tedy 42 hodin. A symbol D značí průměr zemské dráhy.

$$\text{Kratší vzdálenost } t = (N - 1)\tau - \frac{D}{c} \quad (2.1)$$

$$\text{Delší vzdálenost } t' = (N - 1)\tau + \frac{D}{c} \quad (2.2)$$

$$\text{Potom } t' - t = -\frac{2D}{c} \Rightarrow c = \frac{2D}{t' - t} \quad (2.3)$$

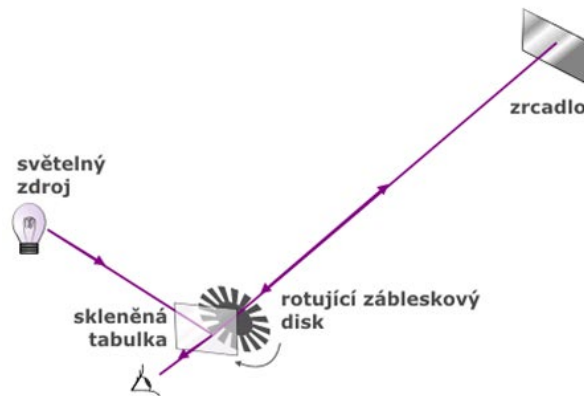
2.3 Fizeauova metoda

Jedná se o první úspěšný pokus přímého měření rychlosti světla v pozemských podmínkách, který provedl francouzský fyzik Hippolyte Fizeau. Metoda využívá rotující ozubené kolo, polopropustné zrcátko a zrcátka. Zrcátko je vzdáleno od ozubeného kola několik kilometrů. Světlo ze zdroje projde mezerou mezi zuby ozubeného kola a putuje k zrcadlu, odrazí se a jde na zpět. Pokud opět treť díru mezi zuby, tak dopadne na detektor světla. V opačném případě detektor nic nezaznamená. Podle nastavení rychlosti otáček ozubeného kola můžeme určit rychlost světla. Rotující ozubené kolo (má N zubů a N mezer) slouží jako přerušovač, který generuje světelné pulzy o časové šířce τ .

$$\tau = \frac{T}{2N} = \frac{1}{2Nf} \quad \text{Kde } T \text{ a } f \text{ jsou perioda a frekvence otáčení kola} \quad (2.4)$$

$$\text{Hledaly se podmínky, kdy nastane první zatmění: } \Delta t = \frac{2D}{c} \Rightarrow c = 4DNf \quad (2.5)$$

Ve Fizeauově pokusu bylo $N = 720$, frekvence 12,6 Hz a vzdálenost mezi zrcátkem a ozubeným kolem byla 8 633 metru. Pro rychlost světla potom dostáváme hodnotu $3,13 \times 10^8$ m/s.

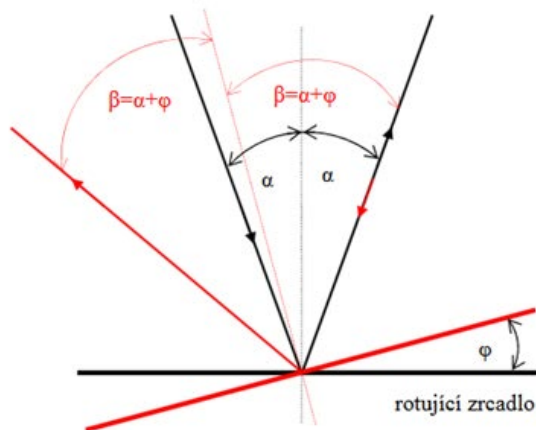


Obrázek 2.2: Ilustrace Fizeauovi metody

2.4 Metoda Foucaultova

Francouzský fyzik Jean Bernard Léon Foucault upravil experiment Fizeau tak, že nahradil ozubené kolo otáčejícím se zrcadlem. Foucault touto metodou naměřil hodnotu $2,98 \times 10^8$ m/s. V dalších experimentech zkrátil dráhu a zvýšil frekvenci otáčení zrcadla, což mu umožnilo změřit rychlost světla ve vodě a dokázal tak, že je menší než rychlost světla ve vzduchu. Doba potřebná k proběhnutí dráhy od rotujícího zrcadla k zrcadlu nepohyblivému a zpět bude: [1]

$$t = \frac{2D}{c} \quad (2.6)$$



Obrázek 2.3: Ilustrace Foucaultovi metody

Mezitím se zrcadlo otočí o úhel:

$$\varphi = 2\pi ft = \frac{4\pi f D}{c} \quad \text{Kde } f \text{ je frekvence otáčení zrcadla} \quad (2.7)$$

Protože svazek odražený od rotujícího zrcadla je pootočen o úhel 2φ , bude obraz zdroje posunut:

$$b = 2\varphi A \quad (2.8)$$

Výsledná rychlost je tedy dána vztahem:

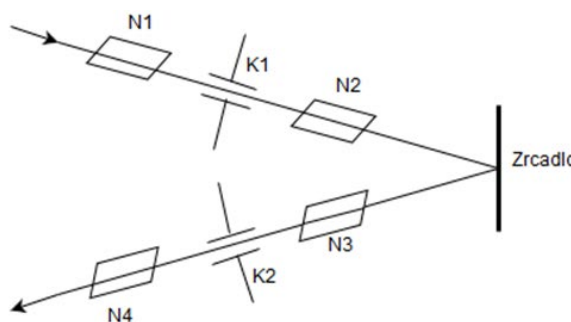
$$c = \frac{8\pi f D A}{b} \quad \text{Kde } A \text{ je vzdálenost mezi statickým a rotujícím zrcadlem} \quad (2.9)$$

2.5 Metoda Karolusova-Mittelstaedtova

Pokus proběhl v roce 1929 a výsledná hodnota naměřená touto metodou je $2,99778 \times 10^8$ m/s. Soustava obsahuje dva Kerrovy články, na které přichází synchronně proměnný rozdíl potenciálů s frekvencí f . Oba články jsou umístěny mezi zkříženými nikoly (polarizační hranoly). Světlo prochází danou soustavou, jestliže na desky článku přichází rozdíl potenciálů. Světlo propuštěné prvním článkem dopadá na zrcadlo, odrazí se a dopadá na druhý článek. Jestliže při této cestě za čas t klesne rozdíl potenciálů na nulu, nepropustí nikol světlo. Určíme-li čas ze známé frekvence proměnného rozdílu potenciálů a známe-li vzdálenost, kterou světlo urazí, můžeme vypočítat rychlost světla.

Nikolův hranol je nejpoužívanějším polarizačním zařízením pro získání a studium lineárně polarizovaného světla. Je složen ze dvou kusů průhledného krystalu. [2]

Optický Kerrův jev nám říká, že index lomu je závislý na intenzitě světelného paprsku vstupujícího do tohoto prostředí. Tato změna indexu lomu, která je různá v různých částech impulsu, významně ovlivňuje změny tvaru a polarizace impulsu při šíření. [9]



Obrázek 2.4: Ilustrace Karolusovi-Mittelstaedtovi metody

2.6 Metoda pomocí mikrovlnné trouby

V dnešní době se dá rychlost světla změřit kupodivu v domácích podmínkách. Stačí k tomu mikrovlnná trouba, tabulka čokolády nebo toustový chleba a pravítko. Srdcem každé mikrovlnné trouby je elektronka, která se nazývá magnetron. Ten generuje většinou záření o frekvenci 2,54 GHz (případně frekvenci lze vyčíst na štítku od trouby), které představuje malou část elektromagnetického spektra, jehož součástí je i světlo. Mikrovlny se odrážejí od kovových stěn trouby a interferují samy se sebou a vzniká stojaté vlnění. Stojaté vlnění je charakteristické kmitnami, tj. místy s maximální výchylkou, a uzly, kde je amplituda nulová. Vzdálenost dvou maxim, respektive minim x je rovna polovině vlnové délky, tedy $\lambda = 2x$. [8]

Před pokusem je nutné vyjmout otáčející se desku, která způsobuje rovnoměrné prohřátí látky. Do trouby pak umístíme například nastrouhanou čokoládu a troubu zapneme. V místech, kde se nacházejí kmitny stojatého elektromagnetického vlnění se potraviny maximálně zahřívají, v tomto případě se zde čokoláda rozteče. Změříme vzdálenost mezi těmito místy

a vypočítáme rychlost světla, dle následujícího vztahu: $c = \lambda f$. Samozřejmě výsledek není úplně přesný, ale relativní odchylka je dost malá, když si uvědomíme jaké pomůckami jsme použili.

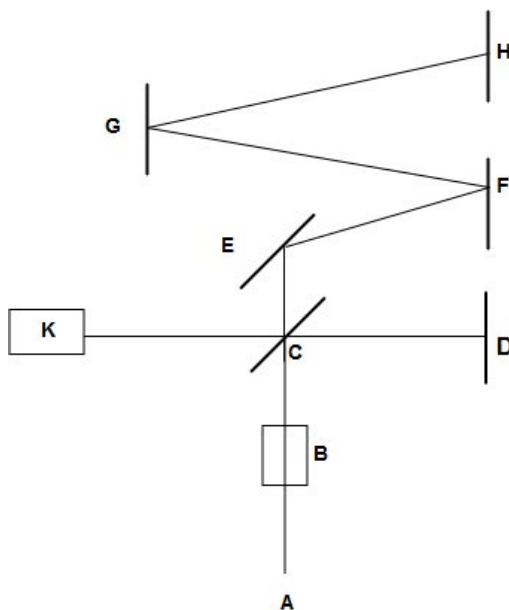
2.7 Andersonova metoda

Andersonova metoda je vylepšená metoda Fizeauova, byla provedena v letech 1937 až 1941. Světelný svazek ze zdroje se střídavě přerušuje Kerrovým článkem, který je připojen k oscilačnímu obvodu. Ze zdroje A se světelný svazek střídavě přerušuje Kerrovým článkem B . Článek propouští modulové pulsy o délce l . Tyto pulsy se dělí na polopropustném zrcadle C . Kratší cestou jde světelný svazek k zrcadlu D a delší cestou k zrcadlům E, F, G, H a zpět k C . Odtud se odráží k fotočlámkům a k zesilovači K . Pokud je dráha od C k H označena jako a . A vzdálenost C od D jako b . Pak pulsy přicházejí s opačnou fází, ve fotočlámku je minimum, když $2(a - b)$ je lichý násobek l .

$$l = \frac{c}{2f} \text{ Kde } f \text{ je frekvence oscilátoru} \quad (2.10)$$

$$\text{Minima nastávají: } 2(a - b) = (2k + 1) \frac{c}{2f} \quad (2.11)$$

Jelikož rychlost světla je dostatečně známá, je možné vypočítat k a zaokrouhlit na nejbližší celé číslo. Pak lze pomocí předešlé rovnice určit rychlost světla jako $2,99776 \cdot 10^8$ m/s.



Obrázek 2.5: Ilustrace Andersonovi metody

Kapitola 3

Metody nepřímé

U těchto metod se měří veličiny, které jsou v jistém vztahu k rychlosti světla. Například se jedná o permitivitu a permeabilitu vakua. Zákonů elektromagnetismu (Maxwellovy rovnice) popisují, že rychlost elektromagnetického záření nezávisí na rychlosti objektu vyzařující záření. Jinak řečeno, světlo vyzařující z rychle se pohybujícího zdroje se šíří stejně rychle jako světlo ze statického zdroje. Všichni pozorovatelé tak naměří shodnou rychlost světla ve vakuu, nezávisle na vztažené soustavě pozorovatele nebo rychlosti zdroje světla. Na rychlost světla c tak můžeme nahlížet jako na konstantu a tento fakt je základem speciální teorie relativity. [5]

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.1)$$

3.1 Bradleyova metoda

Je to nejstarší nepřímá metoda pro měření rychlosti světla. Objevil ji britský astronom James Bradley v roce 1728. Tato metoda využívá aberace světla. Aberace světla [6] je jev, způsobující změnu směru světelného paprsku dostávajícího se k pohyblivému pozorovateli, oproti směru paprsku, který by se dostával ke klidnému pozorovateli. Za čas 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 alfa tak, aby světlo dopadlo do středu okuláru.

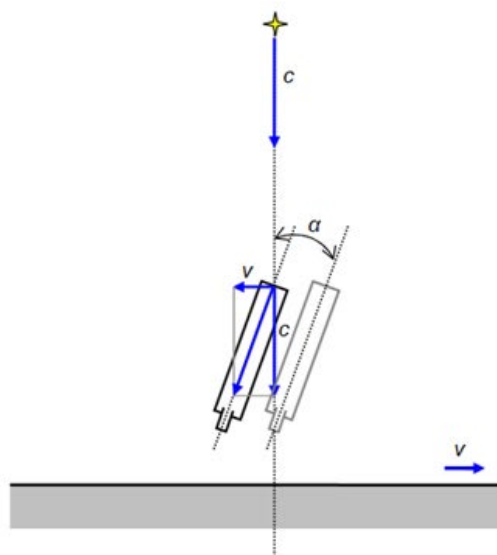
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{vt}{ct} = \frac{v}{c} \quad (3.2)$$

Kde v je průměrná rychlost pohybu Země, tedy 29,7 km/h. Aberační konstanta alfa má hodnotu 20,48 stupně. Bradley tak zjistil, že rychlost světla je rovna $2,991 \times 10^8$ m/s.

3.2 Metoda Rosova-Dorseyova

V roce 1906 z kapacity C_a a C_m kondenzátoru stanovili rychlost světla na hodnotu $2,99784 \times 10^8$ m/s. Kde C_a a C_m jsou hodnoty kapacity téhož kondenzátoru vyjádřené v jednotkách CGSE (centimetr - gram - sekunda - elektrostatická) a CGSM (centimetr - gram - sekunda - elektromagnetická).

$$c = \sqrt{\frac{C_a}{C_m}} \quad (3.3)$$



Obrázek 3.1: Ilustrace Bradleyovi metody

Kapitola 4

Souhrná tabulka

Rok	Badatel	Rychlost [km/s]
1600	Galileo	nenaměřil přesnou hodnotu
1676	Roemer	214 300
1725	Bradley	295 000
1849	Fizeau	315 300
1856	Kohlrausch-Weber	310 800
1862	Foucault	298 600
1892	Michelson	299 853
1929	Karolus, Mittelstaedt	299 786
1940	Anderson	299 776
1949	Houston	299 775
1953	Froome	299 793

Tabulka 4.1: Souhrn naměřených hodnot rychlostí světla

Literatura

- [1] *Metody měření rychlosti světla*. [Online; navštíveno 16.03.2018].
URL http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Metody_mereni_rychlosti_svetla.pdf
- [2] *Nikolův hranol*. 2015, [Online; navštíveno 17.03.2018].
URL http://www.wikina.cz/a/Nikol%C5%AFv_hranol
- [3] *Speed of light*. 2018, [Online; navštíveno 18.03.2018].
URL https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light
- [4] Brabec, P.; Bartůněk, F.: *Šíření světla*. [Online; navštíveno 16.03.2018].
URL <http://www.fyzika007.cz/optika/sireni-svetla>
- [5] Fuka, J.; Havelka, B.: *Optika a atomová fyzika I. Optika*. Praha : Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
- [6] Hlaváč, Z.: *Téma: Aberace světla*. [Online; navštíveno 17.03.2018].
URL <https://www.kme.zcu.cz/download/predmety/414-trol20.pdf>
- [7] Králová, M.: *Rychlost světla*. 2014, [Online; navštíveno 18.03.2018].
URL <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/rychlost-svetla/jak-byla-zmerena-rychlost-svetla>
- [8] Štěpán Ledvinka: *Jak se dá doma změřit rychlost světla* . [Online; navštíveno 24.03.2018].
URL <https://www.online.muni.cz/vite/9259-jak-se-da-doma-zmerit-rychlost-svetla>
- [9] Martin Žáček: *Nelineární charakter optického prostředí*. 2008, bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií.