



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FYO

FYZIKÁLNÍ OPTIKA

Projekt

Měření rychlosti světla

Autor:
Petr Buchal

Login:
xbucha02

26. března 2019

Abstrakt

Tento projekt popisuje vývoj měření rychlosti světla od 17. století po současnost. Podrobněji se zabývá experimenty Galilea Galileie, Ole Roemera, Hippolyta Fizeaua, Leona Foucalta a Alberta Abrahama Michelsona. Součástí projektu je aplikace demonstrující experimenty Galilea Galileie a Hippolyta Fizeaua.

Klíčová slova rychlost světla, měření, Galileo Galilei, Ole Roemer, Hippolyte Fizeau, Leon Foucalt, Albert Abraham Michelson

Obsah

1	Úvod	3
2	Rok 1638 - Galileo Galilei	4
3	Rok 1676 - Ole Roemer	6
4	Rok 1729 - James Bradley	8
5	Rok 1849 - Hippolyte Fizeau	10
6	Rok 1862 - Leon Foucalt	12
7	Rok 1879 - Albert Abraham Michelson	14
8	Moderní experimenty 20. století	15
9	Závěr	16
	Literatura	18
A	Instalační a uživatelská příručka	19
	A.1 Instalace a spuštění	19
	A.2 Ovládání	19

Kapitola 1

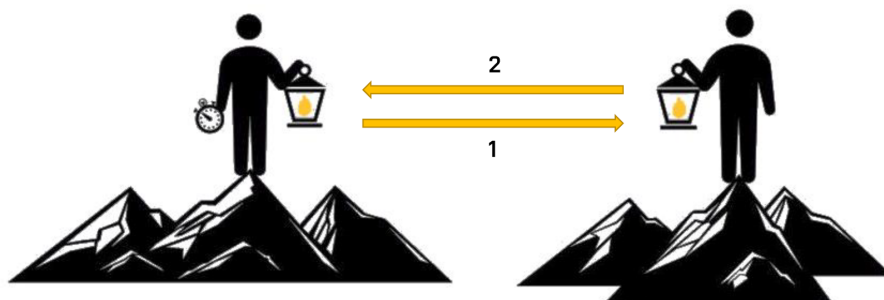
Úvod

Rychlost světla byla tématem zkoumaným již od dob antického Řecka. Například Aristotelés tvrdil, že světlo vyplývá z určité přítomnosti a že je to bezbarvá, statická hmota, která se nepohybuje a je opakem tmy. Jiná teorie zase říkala tvrdila, že světlo je vyzařováno přímo z oka. Z čehož následně odvodil Hérón z Alexandrie, že rychlost světla musí být nekonečná, protože vzdálené objekty (např. hvězdy) se objeví okamžitě po otevření oka. Rychlost světla byla otevřenou otázkou ještě v počátcích moderní fyziky, tomu že je nekonečná věřili i Johannes Kepler, Francis Bacon nebo René Descartes [10]. Měření tuto tezi nakonec vyvrátily a ukázaly, že hodnota rychlosti světla je konečná. Tato práce si klade za cíl postupně popsat jednotlivé experimenty měření rychlosti světla od 17. do 20. století.

Kapitola 2

Rok 1638 - Galileo Galilei

Jeden z prvních pokusů o změření rychlosti světla navrhl v roce 1638 Galileo Galilei. V roce 1667 ho provedla Florentinská Accademia del Cimento [10]. Experiment byl navržen následovně. Na dvou, několik kilometrů vzdálených kopcích, stojí dva lidé s lucernami, viz obrázek 2.1. Zprvu budou dvířka obou luceren zavřená, následně člověk na prvním kopci otevře dvířka lucerny a začne měřit čas. V okamžiku, kdy člověk na druhém kopci uvidí světlo z první lucerny, otevře dvířka své lucerny. Člověk na prvním kopci poté při zpozorování světla z druhé lucerny zastaví stopky [6].



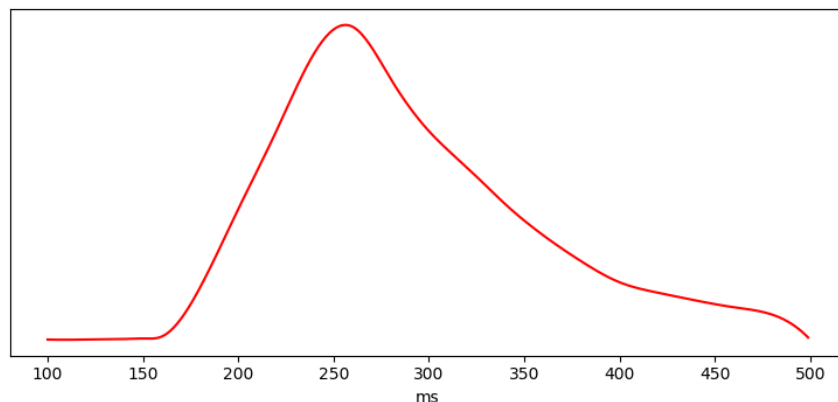
Obrázek 2.1: Schéma Galileova experimentu.

Rychlost světla c se následně spočítá ze vzorce

$$c = \frac{2 * s}{t}, \quad (2.1)$$

kde s je vzdálenost kopců a t je naměřený čas. Teoreticky je Galileův experiment správný, ovšem v praxi hraje důležitou roli opoždění lidské reakce, viz obrázek 2.2 a obecně přesnost měření potažmo hodin. Problém poté je, že Galileo měřil rychlost světla mezi kopci, které od sebe byly vzdálené přibližně 2 kilometry. Doba za kterou

tuto vzdálenost uběhne světlo je o několik řádu nižší, než velikost chyby odhadu reakční doby lidí s lucernami se kterou Galileo počítal.



Obrázek 2.2: Rozložení pravděpodobnosti opoždění lidské reakce na vizuální podnět využitě v aplikaci (převzato z [2])

Pro ilustraci, i kdyby trvalo jedno zpoždění přesně 0.25 s, tak by ideální naměřený čas byl 0.5000133 s, kde 0.0000133 s je doba, kterou by světlu trvalo urazit vzdálenost z jedné hory na druhou a zpět, což bylo v tehdejších podmínkách neměřitelné. Pokud by ovšem byly hory od sebe dále, nevadila by Galileovi ani nepřesnost v odhadu reakční doby lidí s lucernami. Podstatné je, aby doba, kterou světlo cestuje, nebyla zanedbatelná v poměru s chybou odhadu reakční doby lidí. Negativní výsledek experimentu tehdy vysvětloval fyzik Robert Hooke tak, že se nejedná o potvrzení nekonečné rychlosti světla, ale toho, že světlo se musí pohybovat velmi rychle [10]. Problematiku tohoto pokusu dále demonstruje aplikace.

Kapitola 3

Rok 1676 - Ole Roemer

První komu se podařilo změřit konečnou rychlost světla byl dánský astronom Ole Romer. Při studiu Jupiterova měsíce Io si všiml, že ze zákrytu Jupitera vychází Io někdy dříve někdy později než podle tehdejších odhadů měl [3]. V průběhu několika let zjistil, že ze zákrytu Jupitera vychází pravidelně dříve, když se Země přibližuje k Jupiteru a později, když se od něj vzdaluje. Na základě toho určil, že pokud Io vychází ze zákrytu různě na základě polohy mezi Zemí a Jupiterem, rychlost světla nemůže být nekonečná, protože pokud by byla rychlost světla nekonečná, Io by musel ze zákrytů vycházet vždy stejně. Romer změřil, že v okamžiku kdy je Země od Jupitera nejdále, Io vyjde ze zákrytu Jupiteru o 11 minut později než by měl a když je nejbližší vyjde ze zákrytu o 11 minut dříve [4].

Rychlost světla Romer vypočítal následovně. Při pohybu z bodu T_1 do bodu T_2 nastane poslední zatmění dříve o čas, který potřebuje paprsek světla k proběhnutí zemské dráhy D , viz obrázek 3.1. Tuto dobu si můžeme vyjádřit jako

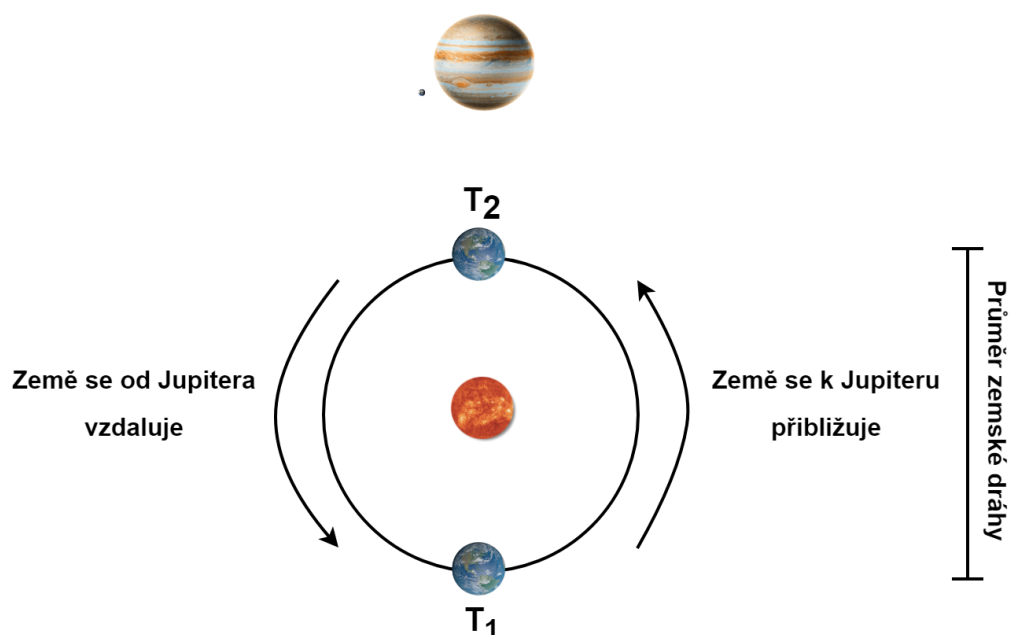
$$t = -\frac{D}{c}, \quad (3.1)$$

kde c je rychlost světla a D je průměr zemské dráhy. Dále při pohybu z bodu T_2 do bodu T_1 nastane poslední zatmění později o čas, který potřebuje paprsek světla k proběhnutí zemské dráhy D , viz obrázek 3.1. Tuto dobu si můžeme vyjádřit jako

$$t' = \frac{D}{c}, \quad (3.2)$$

kde c je rychlost světla a D je průměr zemské dráhy. Následně si z těchto vzorců můžeme vyjádřit

$$t' - t = \frac{2D}{c}, \quad (3.3)$$



Obrázek 3.1: Schéma pozic Země a Jupitera z Romerova experimentu.

$$c = \frac{2D}{t' - t}. \quad (3.4)$$

Při dosazení $D = 149\,597\,887$ km a $t' - t = 22$ min do vzorce 3.4, vyjde rychlost světla 226 663 km/s, což se příliš neliší od Romerova výsledku, kterému v důsledku méně přesného průměru zemské dráhy vyšlo 214 300 km/s [1]. Výsledek Romerova měření se sice od skutečné rychlosti lišil o 26 %, nicméně byl první, komu se podařilo vypočítat, že je rychlost světla konečná.

Kapitola 4

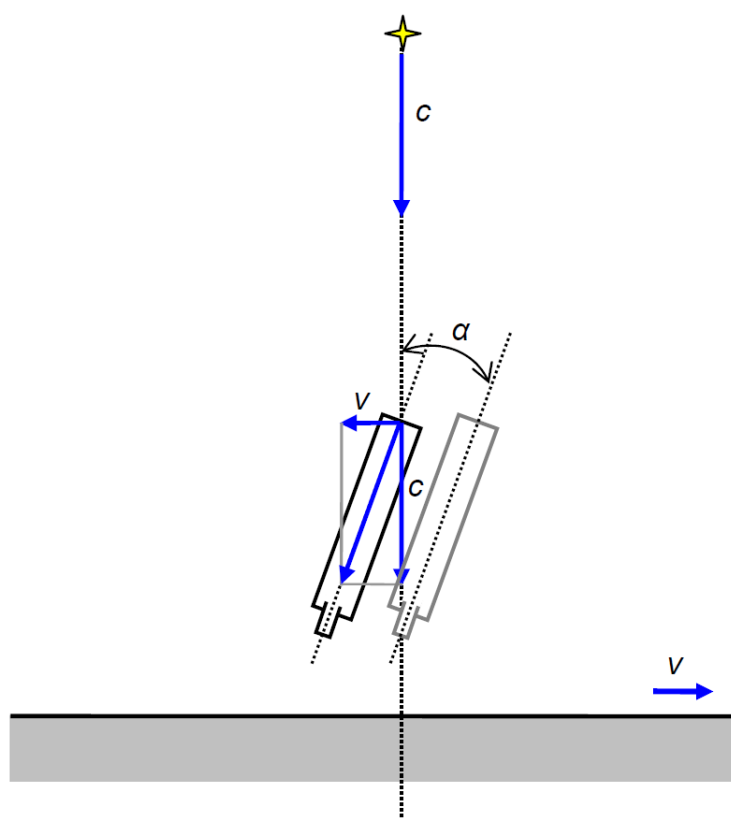
Rok 1729 - James Bradley

Romerovy výpočty rychlosti světla nepřesvědčily celou tehdejší vědeckou komunitu o její konečnosti, to udělala až práce Jamese Bradleyho [10]. Ten při pokusech změřit vzdálenost hvězd pomocí výpočtu jejich paralax naměřil aberaci. Aberací světla se označuje odchýlení světelného paprsku přicházejícího od pozorovaného tělesa k pozorovateli, které je způsobené konečnou rychlostí světla, pohybem pozorovaného tělesa a pohybem pozorovatele [9]. Aberace je pozorovatelná během oběhu Země kolem Slunce. Hvězdy pozorované kolmo ke směru oběžného pohybu Země kolem Slunce se zdají být vychýleny ve směru pohybu Země o tzv. aberační úhel, viz obrázek 4.1 [1].

Aby světlo dopadalo do středu ohniskové roviny okuláru, musí se dalekohled sklonit o aberační úhel α , ten se dá spočítat ze vzorce

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{vt}{ct} = \frac{v}{c}, \quad (4.1)$$

kde t je doba šíření paprsku od objektivu k okuláru, během které urazí paprsek dráhu ct a Země se s dalekohledem se posune o dráhu vt . Bradley experimentálně určil velikost aberační konstanty $\alpha = 20.48''$. S průměrnou rychlostí Země $v = 29.783$ km/s, lze poté spočítat rychlost světla $c = \frac{29.783}{\operatorname{tg}(0.0000993)} = 299\,929.5$ km/s, kde 0.0000993 jsou převedené vteřiny na radiány [12].



Obrázek 4.1: Vznik aberace hvězd, převzato z [1].

Kapitola 5

Rok 1849 - Hippolyte Fizeau

Dalším důležitým milníkem v měření rychlosti světla byl experiment francouzského fyzika Hippolyta Fizeaua v roce 1849 [5]. Ten navrhl experiment s otáčejícím se ozubeným kolem jakožto přerušovačem světelného signálu, viz obrázek 5.1. Při čemž má kolo N zubů a N mezer a otáčí se s frekvencí f . Světlo které prochází mezerami generuje pulzy o časové šířce τ , kde

$$\tau = \frac{1}{2Nf}. \quad (5.1)$$

Tyto světelné pulzy se poté odrážejí od zrcadla a putují zpět k ozubenému kolu, kterým, pokud nenarazí do některého zubu, projdou a zobrazí se u pozorovatele. Čas, který světelnému pulzu zabere cesta k zrcadlu a zpět se dá vyjádřit jako

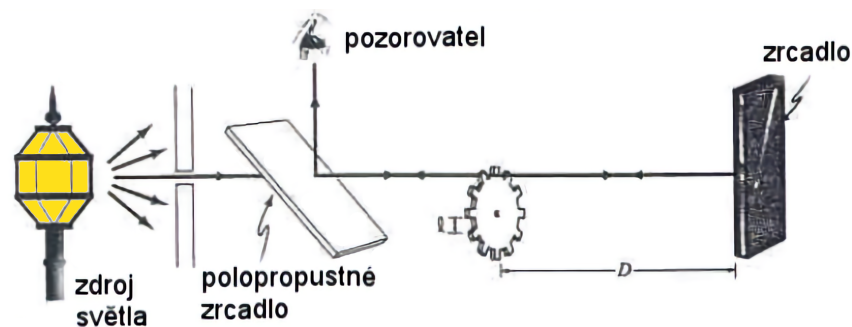
$$t = \frac{2s}{c}, \quad (5.2)$$

kde s je vzdálenost mezi ozubeným kolem a zrcadlem a c je rychlost světla, ta se dá dále vyjádřit jako

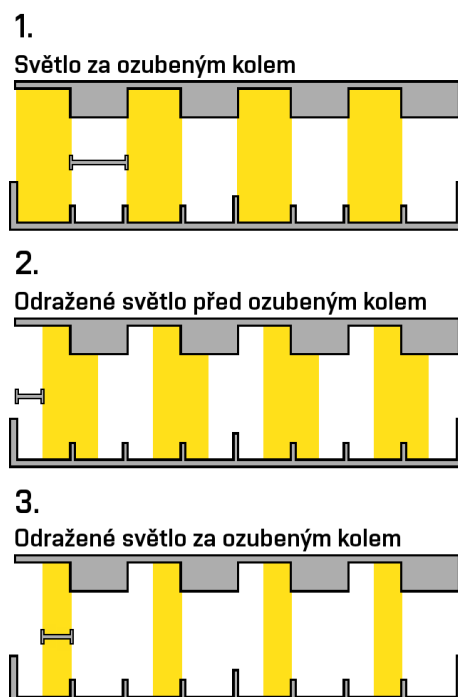
$$c = \frac{2s}{t}. \quad (5.3)$$

Pokud se nalezne frekvence při které bude docházet k zatmění (částečné zatmění je na obrázku 5.2), bude se $t = \tau$, které je možné dopočítat z rovnice 5.1 a ze získané hodnoty t a vzdálenosti s již půjde vypočítat rychlost světla c [1].

Fizeau ve svém experimentu použil kolo s $N = 720$, vzdáleností $s = 8\,633$ m a experimentálně určil, že zatmění nastává při $f = 12.6$ Hz. Z těchto hodnot vypočítal rychlost světla $c = 313\,000$ km/s [1]. Problematiku hledání správné frekvence dále demonstuje aplikace.



Obrázek 5.1: Schéma experimentu Hippolyta Fizeaua, převzato z [1].

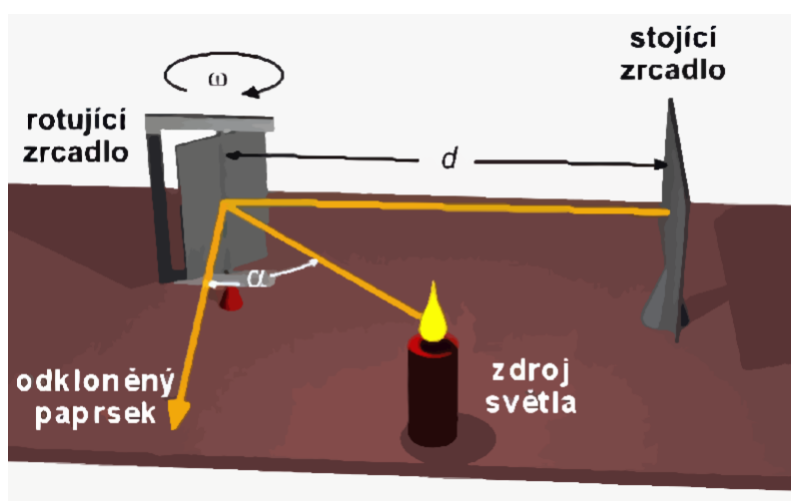


Obrázek 5.2: Časový průběh existence světelných paprsků během experimentu. Dolní osa značí časové intervaly, horní osa značí zuby na kole. První vyznačená vzdálenost odpovídá $\tau = \frac{1}{2Nf}$, druhá vyznačená vzdálenost odpovídá $t = \frac{2s}{c}$, třetí vyznačená vzdálenost odpovídá $\tau - t$.

Kapitola 6

Rok 1862 - Leon Foucalt

V roce 1862 vylepšil francouzský fyzik Leon Foucault Fizeauovu metodu nahrazením ozubeného kola rotujícím zrcadlem [10], viz obrázek 6.1. V jeho experimentu směřuje zdroj světla na otáčivé zrcadlo, od kterého se vyzářené paprsky odráží směrem na nepohyblivé zrcadlo a od něj zpět na pohyblivé. To se mezi tím pootočilo o malý úhel ze kterého Foucalt spočítal rychlost světla [5].



Obrázek 6.1: Schéma experimentu Leona Foucalta, převzato z [7].

Rychlost světla se pomocí Foucaltovy aparatury dá vypočítat ze dvou měření s různými frekvencemi otáčení pohyblivého zrcadla ze vzorce

$$c = \frac{8\pi s_1 s_2 \delta f}{\delta d}, \quad (6.1)$$

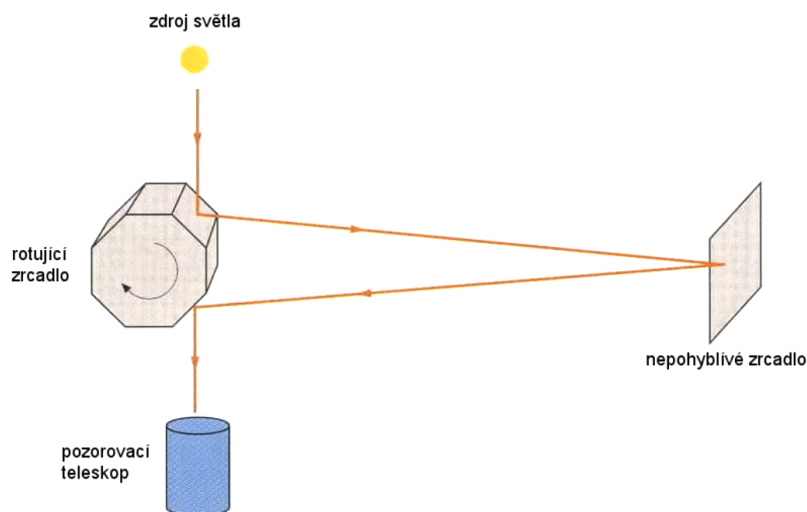
kde c je rychlost světla, s_1 je vzdálenost mezi zrcadly, s_2 je vzdálenost mezi otáčivým

zrcadlem a pozorovatelem (na obrázku [6.1](#) se nachází pozorovatel ve směru odkloněného paprsku), δf je rozdíl ve frekvencích a δd je rozdíl polohy zobrazených paprsků u pozorovatele [\[7\]](#).

Kapitola 7

Rok 1879 - Albert Abraham Michelson

V roce 1879 upravil Foucaltovu metodu americký fyzik Albert Abraham Michelson následovně. Zdroj světla směřoval na rotující hranol na jednom kopci. Od hranolu se odrážel světelný paprsek směrem k nepohyblivému zrcadlu na protějším kopci a od něj se odrážel zase zpět k hranolu. Pokud se hranol otočil přesně o 45° , paprsek dopadl na stejné místo v pozorovacím teleskopu, jinak se vychýlil, viz obrázek 7.1 [8]. Pomocí této metody stanovil Michelson rychlost světla $c = 299\,796\text{ km/s}$ [1].



Obrázek 7.1: Schéma experimentu Alberta Abrahama Michelsona, převzato z [1].

Kapitola 8

Moderní experimenty 20. století

Ve 20. století nadále probíhala měření s cílem, co nejvíce zpřesnit rychlost světla. V roce 1926 zopakoval Albert Abraham Michelson svůj experiment s přesnějším výsledkem 299 798 km/s. V 60. letech se ve Foucaltově metodě jako zdroje světla začaly používat lasery. Použita byla i vylepšená Galileova metoda s vysláním paprsku světla ze Země, jeho dopadem na Měsíc a následným odražením o zrcadla, která na povrchu Měsíce zanechali astronauti z misí Apollo. Další významná měření viz obrázek 8.1. V roce 1983 se na 17. Všeobecném kongresu o mírách a váhách definovala rychlost světla jako 299 792 458 m/s [5].

Rok	Autor a metoda	Naměřená rychlost	Chyba
1907	Rosa and Dorsey EM konstanty	299 710 ± 30 km/s	−280 ppm
1950	Essen and Gordon-Smith dutinový rezonátor	299 792.5 ± 3.0 km/s	+0.14 ppm
1958	K.D. Froome radiová interferometrie	299 792.50 ± 0.10 km/s	+0.14 ppm
1972	Evenson et al. laserové interferometrie	299 792.4562 ± 0.0011 km/s	−0.006 ppm

Obrázek 8.1: Významná měření rychlosti světla 20. století [11].

Kapitola 9

Závěr

Tato práce představila nejdůležitější milníky v oblasti měření rychlosti světla za poslední 4. staletí, v podobě jak přímých, tak nepřímých metod a je relativně komplexní publikací v češtině, která zároveň zpracovává téma čtivým stylem. Aplikace, která je součástí projektu dvě z výše popsaných metod intuitivně demonstuje a je rozšiřitelná pro přidání vizualizací dalších experimentů.

Literatura

- [1] Vladimír Baumruk. Metody měření rychlosti světla, 2007. http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Metody_mereni_rychlosti_svetla.pdf.
- [2] Human Benchmark. Reaction time statistics. <https://www.humanbenchmark.com/tests/reactiontime/statistics>.
- [3] Martin Brada. Kdo první změřil rychlost světla?, March 2016. <http://www.hvezdarnaplzen.cz/2016/03/29/kdo-prvni-zmeril-rychlost-svetla/>.
- [4] c0ldsnap. The speed of light: A digital story. <https://www.youtube.com/watch?v=X2u8IZzycdM>, November 2011.
- [5] Václav Kaizr. Měření rychlosti šíření světla. týdeník, July 2004. https://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_s1.php.
- [6] Hana Koudelková. Galileo galilei a měření rychlosti světla, August 2016. <http://reseneulohy.cz/218/galileo-galilei-a-mereni-rychlosti-svetla>.
- [7] Kevin McFarland. Speed of light demonstration by the foucault method. <https://www.pas.rochester.edu/~pavone/particle-www/teachers/demonstrations/FoucaultDemonstration.htm>.
- [8] Jaroslav Reichl. Měření velikosti rychlosti světla. <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/664-mereni-velikosti-rychlosti-svetla>.
- [9] Wikipedia. Aberace (astronomie) — Wikipedia, the free encyclopedia. [http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Aberace%20\(astronomie\)&oldid=16930554](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Aberace%20(astronomie)&oldid=16930554), 2019. [Online; accessed 25-March-2019].
- [10] Wikipedia. Rychlost světla — Wikipedia, the free encyclopedia. <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Rychlost%20sv%C4%9Btla&oldid=16979493>, 2019. [Online; accessed 25-March-2019].

- [11] Wikipedia. Speed of light — Wikipedia, the free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Speed%20of%20light&oldid=887039412>, 2019. [Online; accessed 26-March-2019].
- [12] Wikipedia. Země — Wikipedia, the free encyclopedia. <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Zem%C4%9B&oldid=17020930>, 2019. [Online; accessed 25-March-2019].

Příloha A

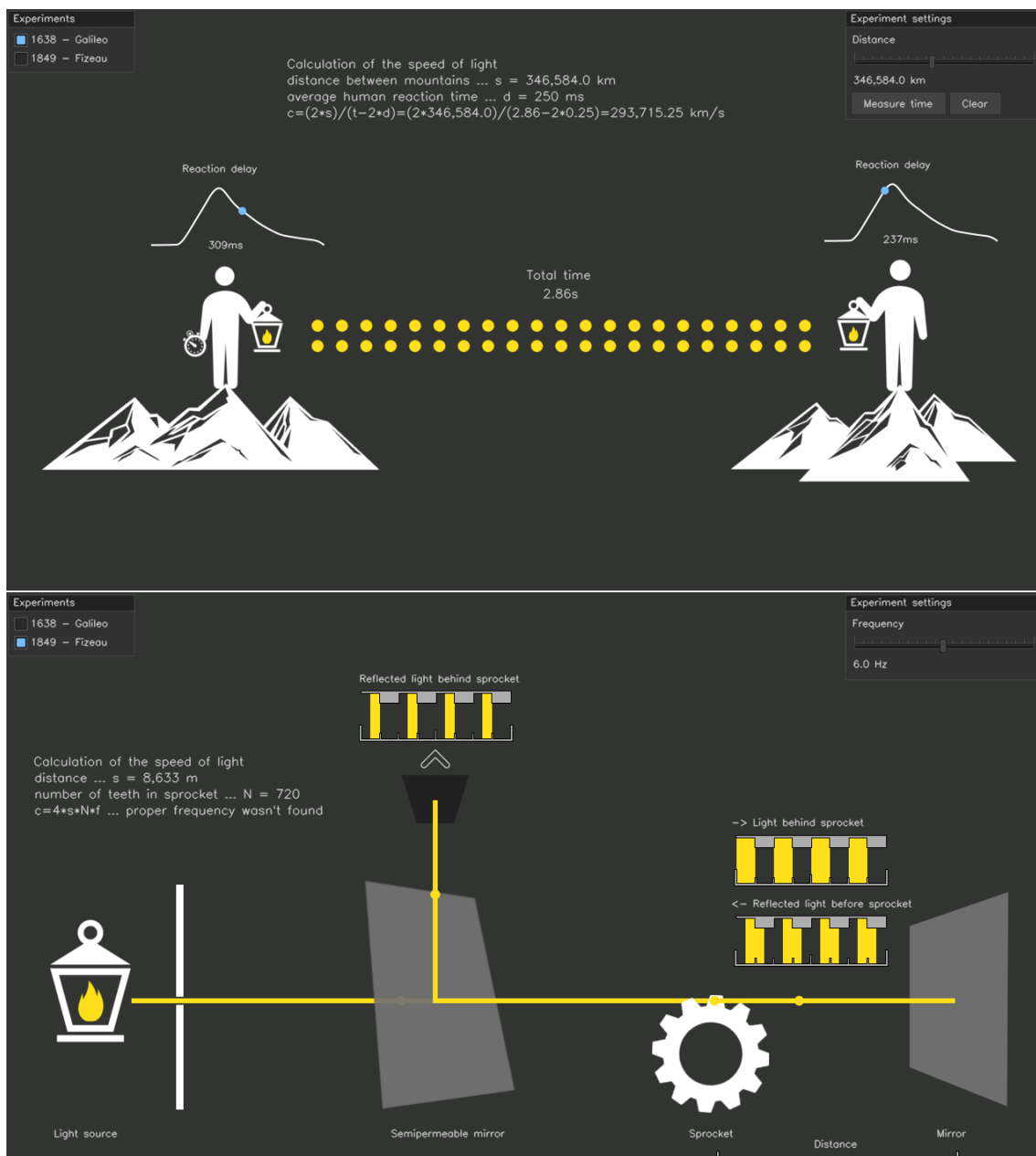
Instalační a uživatelská příručka

A.1 Instalace a spuštění

Pokud máte k dispozici zkompilevanou verzi aplikace, spouští se souborem *main.exe* ve složce *SoLM*. Pokud máte k dispozici zdrojové kódy, je možné aplikaci spustit v prostředí s nainstalovaným Pythonem a následujícími knihovnami *cv2*, *cvui*, *matplotlib*, *numpy*, *scipy* a *timeit*, zadáním příkazu *python main.py* do příkazové řádky případně terminálu.

A.2 Ovládání

V aplikaci jsou implementovány dva experimenty měření rychlosti světla Galileův a Fizeův, viz obrázek [A.1](#). Přepínání mezi experimenty se nachází vlevo nahoře. Nastavování experimentů se nachází vpravo nahoře. Pro vypnutí aplikace je třeba stisknout *control+c* v příkazovém řádku případně terminálu.



Obrázek A.1: Snímky obrazovky jednotlivých experimentů implementovaných v aplikaci.