

Měření metru pomocí mikrovlnného záření

J. Chlum, K. Šobrová

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1
chlumja3@fjfi.cvut.cz, kaja.sobrova@seznam.cz

Abstrakt

Potřeba měřit vzdálenosti tu byla odjakživa. Množství jednotek bylo obrovské, ale jako všude i tady probíhala evoluce, až se ustálila nyní nejpoužívanější jednotka vzdálenosti, metr. Naší snahou bylo prozkoumat, co předcházelo této jednotce, jakými metodami se ke stanovení metru dalo dojít, a tyto metody také vyzkoušet.

1 Historie jednotek délky

1.1 Raná historie

První pokusy, o sjednocení jednotek vzdálenosti, jsou datovány už od starověkého Egypta. K měření se využívala část těla, nejčastěji délka předloktí faraona. Takto například vznikla jednotka královský loket (v našich jednotkách 52,5 cm) nebo posvátný loket (70 cm). Na území nynějšího Česka jsou záznamy o sjednocených jednotkách z dob Přemysla Otakara II. (rok 1268). Jeden pražský loket (59 cm) byl roven 3 pídím. Jedna píd' se rovnala 10 prstů a jeden prst byl roven 4 ječným zrnům.

O 500 let později zavedla Marie Terezie jednotky, které jsou velmi podobné těm dosud používaných v mnoha anglicky mluvících zemích. Byl to například palec (2,6 cm), stopa (31,6 cm), loket (77,7 cm), sáh (189,6 cm) nebo poštovní míle (7,585 km).

1.2 Vývoj metrické soustavy

Významným posunem v měření vzdáleností byla myšlenka jednotky zavedené podle univerzálně měřitelného jevu. S prvním takovým návrhem přišel v roce 1668 John Wilkins, který chtěl použít zdánlivě univerzální délku sekundového kyvadla (kyvadla s půlperiodou jedné sekundy). Tento návrh se ovšem již krátce poté ukázal jako nevhodný kvůli odchylkám této délky, které v letech 1671-73 naměřil Jean Richer.

Později, jako výsledek revoluce ve Francii, Francouzská akademie věd zavedla tzv. poledníkový metr. Ten byl definován jako desetimilióntina vzdálenosti severního pólu a rovníku po pařížském poledníku. Samotným měřením této vzdálenosti byli roku 1791 pověřeni Pierre Méchain a Jean-Baptiste-Joseph Delambre. Hlavní část měření trvalo přes šest let a následovala ještě další upřesňující měření. Měření byla omezena terénem, nespolutracujícím obyvatelstvem i nemocemi, na jejichž následky bohužel Méchain zemřel a byl nahrazen François Aragem.

Dle výsledků měření pařížského poledníku byl v roce 1799 vyhotoven tyčový metr, tzv. Mètre des Archives. Jeho kopie byly veřejně dostupné a používání metrických jednotek se stalo dokonce povinným. Ačkoliv se za vlády Napoleona Bonaparte od metru upustilo ve prospěch tzv. Mesures usuelles, po jeho sesazení se metrický systém vrátil. Následovaly různé optimalizace systému, které vyvrcholily roku 1875 Metrickou konvencí. Na základě této mezinárodní smlouvy vznikl Mezinárodní úřad pro míry a váhy a byly vyrobeny etalony metru pro jednotlivé členské státy.

1.3 Moderní definice metru

S rostoucí potřebou přesnosti ve vědě a průmyslu začal být tyčový metr nedostatečným. V roce 1960 tak vznikla první definice metru pomocí opravdu univerzální konstanty. Metr byl roven 1 650 763,73 násobku vlnové délky spektrální čáry ve vakuu, které přísluší přechodu kryptonu-86 mezi energetickými hladinami $2p^{10}$ a $5d^5$. V roce 1983 byla definice upravena. Nově byl metr roven vzdálenosti kterou urazí světlo za $\frac{1}{299\,792\,458}$ s. Nejnovější změna byla provedena v květnu 2019. Rychlost světla se nyní považuje za konstantu.

2 První experiment

2.1 Eratosthenovo měření

Eratosthenes byl řecký matematik působící jako alexandrijský knihovník ve 2. století př. n. l. Byl také prvním, kdo změřil obvod Země, a to navíc aniž by opustil Alexandrii. Dozvěděl se, že v Ausánu na letní slunovrat jsou stíny vrhané přesně kolmo k zemi. Pozorování, že v Alexandrii tomu tak nebylo, ho dovedlo k myšlence změřit obvod Země porovnáním úhlů, pod kterými jsou vrhány stíny v Asuánu a Alexandrii, se vzdáleností těchto dvou míst.

Pro toto měření Eratosthenes použil několik ne zcela přesných předpokladů a to, že místa měření leží na jednom poledníku, že Země je dokonale kulatá a že sluneční paprsky jsou všude rovnoběžné. S těmito předpoklady jsme pracovali i v našem vlastním měření.

2.2 Naše měření

Náš první experiment byl inspirován první definicí metru, tedy jako $\frac{1}{40000000}$ obvodu Země, a také Eratosthenovým měřením. Měřili jsme délku stínu násady na smeták o výšce $h = 108$ cm na dvou různých místech nacházejících se na stejném poledníku v pravé poledne.

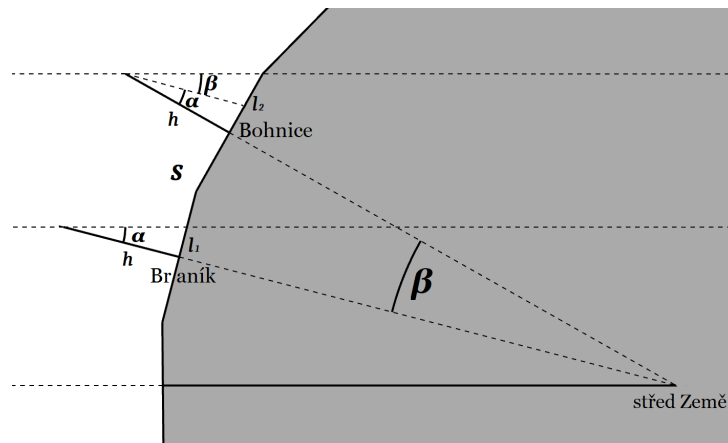
První měření probíhalo na Braníku dne 19. 10. 2019 a délka stínu l_1 byla rovna 184 cm. Druhé měření jsme skrz špatné počasí mohli učinit až o dva dny později 21. 10. 2019. Délka naměřeného stínu l_2 v Bohnicích se rovnala 193 cm. Vzdálenost mezi těmito místy je $s = 11,35$ km.

Ze vzorce

$$O = \frac{s * 360}{\arctan\left(\frac{l_2}{h}\right) - \arctan\left(\frac{l_1}{h}\right)}$$

nám vyšel obvod Země, a to 3 462 km. Přepočtem by námi nově změřený metr měl délku 8,7 cm skutečných jednotek SI.

Relativní chybu obou měření délky stínu jsme stanovili na 3%. Podle vzorce pro chybu nepřímého měření jsme vypočítali relativní chybu námi změřeného metru jako 2000%.



Obr. 1: Schéma měření obvodu Země

3 Druhý experiment

Druhý experiment spočíval ve vypočítání délky metru pomocí mikrovlnného záření. V mikrovlnné troubě vzniká stojaté elektromagnetické vlnění a pokud do ní umístíme objekt, v našem případě čokoládu, bude se nejvíce ohřívat v místech, kde se nacházejí jeho kmitny. Z údajů, které máme zadané od výrobce mikrovlnné trouby a z výsledků experimentu jsme schopni přepočtem určit rychlost světla a tou poté zadefinovat náš metr.

Vlastní experiment probíhal tak, že jsme nejprve umístili do mikrovlnné trouby bez otáčecího talíře tabulku čokolády a tu zapnuli nejprve na 3 minuty. Čokoláda se po tak dlouhé době roztekla celá a nedaly se z ní vyčíst potřebné vzdálenosti. Čas jsme změnili nejprve na minutu, poté na 40 sekund, které už vyhovovaly našim požadavkům. Po 40-ti sekundách byla čokoláda rozteklá pouze na kmitnách.

Pomocí pravítka jsme určili medián vzdálenosti mezi dvěma rozteklými body. Vlnová délka nám vyšla $(6,0 \pm 0,5)$ cm. Frekvence mikrovlnné trouby byla výrobcem uvedena jako 2,45 GHz. Podle vzorce $c = f \cdot \lambda$ jsme určili naši rychlost světla jako $(29 \pm 2) \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. S pomocí této hodnoty jsme zadefinovali náš nový metr, který by byl rovný (98 ± 7) cm ve skutečných jednotkách SI.



Obr. 2: Tabulky čokolády rozteklé pouze v kmitnách

4 Závěr

V případě prvního experimentu nám vyšla hodnota s velmi velkou chybou měření. Tento postup očividně není vhodný na definici metru. Zpřesnění výsledku by ale zajisté pomohlo, kdybychom použili vodováhu, aby byla zajištěná kolmost tyče na povrch Země, a kdybychom měření prováděli ve stejný den a na vzdálenějších místech.

Druhý experiment již přinesl lepší výsledky a také důkaz, že jednotku metr si lze zavést i v domácích podmínkách.

Reference

- [1] kol. autorů, *History of the metre*, https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_metre
- [2] Madhvi Ramani, *How France created the metric system*, <http://www.bbc.com/travel/story/20180923-how-france-created-the-metric-system>
- [3] Anthony Abreu, *How did Eratosthenes measure the circumference of the earth?*, <https://anthonybloggeneral.wordpress.com/2012/07/03/eratosthenes-earth-circumference/>
- [4] Tesařík Bohumil, *Z historie měření*, <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/fyzika-a-klasicka-energetika/1964-z-historie-mereni>
- [5] kol. autorů, *Metr*, <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1639>
- [6] BIPM, *Length: Unit of length (metre)*, <https://www.bipm.org/metrology/length/units.html>