

Jak měřit fot'ákem

A. Šolarová*, M. Holeksová**,

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

*solarade@fjfi.cvut.cz, **holekma1@fjfi.cvut.cz

Abstrakt

K různým fyzikálním pokusům je potřeba široká řada měřicích přístrojů, které mnohdy nepatří k nejlevnějším, nebo k nejdostupnějším. Cílem projektu je představit snadné měřicí metody pomocí fotoaparátu a věcí dostupných v kuchyni tak, aby je na základě našeho projektu každý mohl doma zopakovat. Představíme metody jak změřit velikost, vzdálenost, teplotní roztažnost, mechanické napětí, nebo rotaci Země.

1 Teoretický úvod

1.1 ISS

ISS je zkratka pro největší umělou družici Země, mezinárodní vesmírnou stanici (International Space Station). Na noční obloze je jedním z nejvýraznějších objektů, neboť díky odrazivosti solárních panelů dosahuje magnitudy až -4. Jelikož je pohyb ISS dobře predikovatelný, existuje množství webových stránek, kde lze vyhledat dokonce přesný čas a pozorovatelné oblasti jejího tranzitu přes Slunce. My jsme použili web Transit-finder [1].

1.2 Výpočet teplotní závislosti elektrického odporu a teplotní délkové roztažnosti

Teplotní závislost odporů je dána vzorcem:

$$R_v = R_p(1 + \alpha_R(\vartheta_v - \vartheta_p)) \quad (1)$$

kde R_p je počáteční odpor měřeného objektu, ϑ_p jeho počáteční teplota, R_v odpor objektu po ohřátí, ϑ_v jeho teplota po ohřátí a α_R koeficient teplotní závislosti odporu.

Teplotní délková roztažnost je dána vzorcem:

$$l = l_0(1 + \alpha_l(\vartheta_2 - \vartheta_1)) \quad (2)$$

kde l_0 je počáteční délka měřeného objektu, ϑ_1 jeho počáteční teplota, l jeho délka po změně teploty, ϑ_2 jeho teplota po změně a α_l koeficient teplotní délkové roztažnosti.

1.3 Foucaultovo kyvadlo

Foucaultovo kyvadlo je důležitým prostředkem pro detekci rotace Země. Zachovává si svou rovinu kyvu navzdory rotaci Země, takže z hlediska pozorovatele na Zemi se tedy zdá, že se kyvadlo otáčí. V našich zeměpisných šířkách se kyvadlo stočí přibližně o $11^\circ 30'$ za jednu hodinu, tedy o $2^\circ 52' 5''$ za 15 minut. Na základě znalosti úhlu, o který se kyvadlo stočilo za časový interval lze vypočítat dobu rotace Země kolem vlastní osy vztahem [2]:

$$T = \frac{360^\circ}{\varphi} \cdot \sin(50^\circ 4,67') \text{ [h]} \quad (3)$$

kde φ je úhlová rychlost ve stupních za hodinu, kterou se stáčí rovina kyvu.

2 Experiment

2.1 Velikost velice malých objektů

Metodu určování velikosti pomocí fotografie jsme se rozhodli krátce popsat především proto, že ji aplikujeme u většiny následujících experimentů. Rozhodli jsme se pro její demonstraci na několika kouscích drobného kuchyňského nepořádku. Na bílý papír jsme vedle pravítka umístili zrnko rýže, pohanky a máku a přiložili k nim dva rozdílné vlasy. Pro

zpřesnění výsledku jsme opatřili náš fotoaparát sadou šesti mezikroužků, čímž jsme vytvořili makroobjektiv. Objekty na papíře jsme vyfotili i webkamerou s přeostrěným objektivem. Určení velikosti pak probíhá pomocí jakéhokoliv editoru fotografií, který ukazuje počet pixelů, nebo souřadnice (gimp, mtpaint, irfan). Díky pravítku jsme určili, kolik pixelů odpovídá jednomu milimetru (pro přesnost jsme naměřili kolik pixelů má 10 mm a výsledek podělili). Toto číslo označme K. Následně jsme změřili pixelovou velikost měřených objektů. Toto číslo označme M. Výsledná velikost V v milimetrech se poté spočítá jako $V = \frac{M}{K}$ [mm]. Tuto metodu lze použít například k určení tloušťky drátu.

2.2 Vzdálenost ISS od pozorovatele

Jelikož jsme tak trochu nadšenci do kosmonautiky, vypravili jsme se jednoho letního dne obtěžkáni fototechnikou fotit jeden z tranzitů ISS přes Slunce. Pro tuto příležitost jsme naše objektivy vybavili ochranným slunečním filtrem, vyrobeným triviálně z tmavé fólie ze staré diskety. Díky tomu se nám podařilo vyfotit kromě velkého oranžového slunečního kotouče také černý flek ve tvaru písmene H představující ISS. Na základě těchto fotografií jsme se rozhodli určit vzdálenost ISS od místa fotografování tranzitu. Více v sekci 3.1-Výsledky.

2.3 Koeficient teplotní závislosti odporu

Tuto fyzikální veličinu jsme původně neměli v plánu určit, nicméně jisté komplikace při určování koeficientu délkové teplotní roztažnosti nás k tomu navedly. Jak si popíšeme v sekci 3.3, bylo určení teplotní závislosti odporů vcelku snadným a elegantním řešením vzniklého problému. Jelikož jsme tímto pokusem pouze kompenzovali komplikace jiného pokusu, nepoužili jsme při něm fotoaparát. Metr dlouhý drát (který byl měděný, ale pro zajímavost předstíráme, že materiál neznáme) jsme ponořili do rychlovarné konvice naplněné vodou. Připojili jsme jej k ohmmetru, postupně zvyšovali teplotu vody a odečítali hodnoty odporu. Díky znalosti dvojic teplot a odporů jsme určili výsledný koeficient. Viz sekce 3.2-Výsledky.

2.4 Koeficient délkové teplotní roztažnosti

Pro účely tohoto experimentu jsme vytvořili následující sestavu: do horní části uříznuté palety, tvořící přes metr dlouhé stojící prkno, jsme zatloukli hřebík. Z něj jsme spustili k dolní části palety drát (měřený v pokusu 2.3). V dolní části palety jsme vytvořili páku, pomocí dřívka s laserem a dvěma háčky, kde zadní háček byl pověšen na druhý hřebík na paletě a za přední háček jsme uchytili druhý konec drátu. Drát jsme připojili na regulovatelný zdroj proudu a do obvodu jsme zapojili i ampérmetr s voltmetrem. Ohřívající se drát se díky teplotní roztažnosti prodlužoval. Tím pohyboval v dolní části palety ramenem páky s laserem. Laser svítil na co možná nejvzdálenější zeď a tím několikanásobně zvýrazňoval nepatrný pohyb drátu. I zde zachováváme předstíranou neznalost materiálu drátu a budeme na základě vypočítaného koeficientu chtít materiál určit. Více v sekci 3.3-Výsledky.

2.5 Mechanické napětí

Při tomto experimentu jsme pouze pozorovali a nic nevypočítávali. Využili jsme faktu, že mechanicky namáhaná tělesa mění rovinu polarizace. Displej Notebooku nám posloužil jako zdroj polarizovaného světla a různé objekty jsme proti němu fotili přes polarizační filtr. Osvědčilo se zkoumat hlavně plastové předměty. Stejně barvy v zobrazených duhových vzorech představovali spojnice míst o stejném mechanickém napětí. U různých předmětů tak bylo možné odhadnout jak byly vyrobeny, nebo který výrobek má v jaké části výrobní vadu. Vykrojili jsme také zářez v kousku plexiskla a pod polarizačním filtrem na něj silově působili a sledovali změny barev na jeho povrchu. Tak šlo odhadnout, kde by se materiál začal lámat.

2.6 Čas otočení Země kolem vlastní osy

Zde jsme si postavili Foucaultovo kyvadlo. Myšlenka byla umístit na kyvadlo barevný blikáč naprogramovaný tak, aby měnil barvy každých pět minut a kyvadlo shora snímat fotoaparátem na dlouhou expozici. Bylo tedy nutné navrhnout závěs tak, aby neovlivňoval pohyb kyvadla a zároveň mu dovolil houpat se alespoň hodinu. To se podařilo pomocí břitů (kříže vyrobeného ze dvou hřebíků a soustavou háčků). Podrobnější popis závěsu je v doprovodné prezentaci. Kyvadlo mělo závěs dlouhý 3 m se zátěží 2 kg a pozorovací dobu mělo přes 2 hodiny. Pro větší přesnost jsme pokus opakovali i na kyvadle FS ČVUT, se závěsem 21 m, zátěží 34 kg a pozorovací dobou přes 3 hodiny. Více v sekci 3.4-Výsledky.

3 Výsledky

Podstatnou částí výsledků jsou fotografie. Všechny jsou obsaženy v projektové prezentaci a jsou doplněny množstvím vysvětlujících nákresů. Doporučujeme si nákresy prohlédnout.

3.1 Vzdálenost ISS od pozorovatele

Na pořízené fotografii byla patrná tečka na slunci. Protože byla fotografie pořízena již před časem, nedochovali jsme informaci o úhlové velikosti stanice. Před určením její vzdálenosti od pozorovatele bylo nutné její úhlovou velikost určit. Pomocí tangentu polovičního úhlu jsme určili úhlovou velikost Slunce na fotografii podle vztahu:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{D}{2L} \quad (4)$$

kde φ je úhlová velikost Slunce, D je jeho průměr a L jeho vzdálenost od Země. Díky znalosti pixelové velikosti Slunce a jeho úhlové velikosti jsme pomocí pixelové velikosti ISS určili její úhlovou velikost. Pro určení vzdálenosti ISS jsme využili opět vztah (4), kde φ je úhlová velikost ISS a D její odpovídající rozměr. Vzdálenost jsme určili jako 533 km (víme, že reálně byla od nás stanice vzdálena 536 km). Výsledek má však obrovskou relativní chybu 20% (± 92 km), způsobenou chybou odečtu velikosti ISS z fotografie (10 ± 2 pixely).

3.2 Koeficient teplotní závislosti odporu

V rychlovarné konvici jsme změřili celkem sedm dvojic teplot a proudů. První naměřené hodnoty jsme považovali za počáteční a každou následující dvojici jako koncovou. Pro každou takovou dvojici jsme tedy pomocí vztahu (1) určili koeficient α_R . Výsledný koeficient jsme stanovili jako průměrnou hodnotu všech dílčích, čímž jsme chtěli maximálně výsledek zpřesnit. Koeficient jsme spočítali jako $\alpha_R = (0,0039 \pm 0,0001)[K^{-1}]$, což věrně odpovídá tabulkové hodnotě pro měď $\alpha_{R-MĚĎ} = 0,0032[K^{-1}]$ [3]. Tento koeficient je však podobný i u jiných vodičů, proto pouze na základě jeho znalosti není možné s jistotou určit materiál.

3.3 Koeficient délkové teplotní roztažnosti

V průběhu tohoto experimentu jsme narazili na drobnou komplikaci, neboť ze vzorce (2) je patrné, že potřebujeme znát ještě teplotu drátu. Počáteční teplotu bylo možné stanovit stejnou jako byla pokojová před začátkem měření. Jelikož jsme však ohřívali drát proudem, neměli jsme možnost stanovit jeho teplotu po ohřátí. Využili jsme tedy toho, že jsme otestovali drát ve známém prostředí (v rychlovarné konvici s vodou, viz sekce 2.3) a díky tomu určili koeficient α_R . Poté jsme měřili jím protékající proud a napětí mezi jeho konci, čímž jsme dostali potřebné údaje, abychom mohli pomocí Ohmova zákona určit jeho odpor. Na základě znalosti jeho odporu před i po ohřátí, jsme ze vzorce (1) dopočítávali jeho aktuální teplotu. Tím jsme dostali všechny potřebné veličiny pro vzorec (2) a pro určení koeficientu délkové teplotní roztažnosti. Ten jsme určili obdobným způsobem jako α_R , také jako průměrnou hodnotu z vícero měření. Prodloužení drátu jsme počítali díky podobnosti

trojúhelníků pomocí měření poklesu laserové tečky na zdi. K tomu jsme využili jednak milimetrový papír, na který jsme tečku promítali, jednak pixelovou metodu ze sekce 2.1 a obě metody jsme porovnali. Pro odečet z papíru byl výsledek $\alpha_{l-MP} = (0,0164 \pm 0,0026)[10^{-3}K^{-1}]$ a pro určování pomocí pixelové metody $\alpha_{l-PIX} = (0,0168 \pm 0,0011)[10^{-3}K^{-1}]$. Výsledky se skutečně nejvíce blíží tabulkové hodnotě mědi $\alpha_{l-M\check{E}\check{D}} = 0,017[10^{-3}K^{-1}]$ [4] a z chyby je zároveň patrné, o kolik metoda pixelů ovlivnila svou přesností výsledek.

3.4 Čas otočení Země kolem vlastní osy

Díky blikači, měnícímu barvu každých pět minut byly na fotografii patrné barevné proužky. Věděli jsme tedy, že trojice proužků představuje časový interval 15 minut. Stačilo jen z fotografie pomocí metody 2.1 a vlastnosti funkce tangens určit úhel, který svírají. Z kyvadla na půdě jsme určili dobu rotace Země pomocí vztahu (3) jako $T = 18,5$ [h], pomocí kyvadla na fakultě strojní jako $T = 22,5$ [h]. Odchylna od hodnoty 24 hodin v domácích podmínkách mohla být způsobena nedostatečnou volností závěsu, nebo prouděním vzduchu na půdě. Nepřesnost fakultního kyvadla byla menší, přesto stále větší než jsme očekávali. Je možné, že závěs tohoto kyvadla je po letech nevybíravého zacházení (kyvadlo je volně dostupné každému ve vstupní hale) již také poškozený, nebo jsme do měření zanesli chybu my tím, že jsme pro nedostatek vybavení snímali kyvadlo pod mírným úhlem.

4 Závěr

Úspěšně jsme aplikovali metodu použití foťáku k určení množství zajímavých údajů. Stanovili jsme vzdálenost ISS od místa sledování tranzitu na 533 ± 92 kilometrů. Dále jsme určili koeficient teplotní závislosti odporu mědi jako $\alpha_R = (0,0039 \pm 0,0001)[K^{-1}]$ a koeficient délkové teplotní roztažnosti mědi nejpresněji jako $\alpha_l = (0,0168 \pm 0,0011)[10^{-3}K^{-1}]$. Úspěšně jsme pozorovali mechanické namáhání řady plastických výrobků. Nakonec jsme spočítali dobu rotace Země kolem vlastní osy nejpresněji na 22,5 hodiny. V průběhu měření jsme zároveň porovnali různé techniky měření a ukázali rozdíly v jejich přesnosti.

Poděkování

Rádi bychom poděkovali oběma vrátným na vrátnici FS ČVUT za jejich ochotu vpustit nás mimo oficiální dobu do budovy a snášet naši přítomnost přes tři hodiny. Dále chceme poděkovat panu Svobodovi, který nás nechal odprezentovat náš projekt i přes náš neobvyklý přístup k semináři. Zvláštní poděkování patří našemu dobrému kamarádovi ing. Michalu Majerovi, bez něhož by se celý projekt nemohl uskutečnit. Kromě svých rozsáhlých fyzikálních znalostí, jimiž nám objasnil mnoho nepochopených jevů přispěl také množstvím brilantních nápadů. Zároveň nám vytvořil bohaté technické zázemí a kromě poskytnutí potřebných měřáků, zdroje a jiných předmětů zároveň pomohl s technickými záležitostmi, s nimiž děvčata přicházejí do styku jen zřídkakdy (například zatlučení hřebíku, pájení, nebo horolezení po střešních krovech, o nočním bdění ani nemluvě). Děkuje tedy za jeho ochotu a vstřícnost a celý projekt mu tímto věnujeme.

Reference

- [1] kol. autorů, Tranzit-finder, <https://transit-finder.com>
- [2] kol. autorů, poster Foucaultovo kyvadlo, FS ČVUT, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2
- [3] GymKT, Fyzikální kabinet, <http://kabinet.fyzika.net/studium/tabulky/tepelna-kapacita-roztaznost.php>
- [4] J. Košťál, Teplotní závislost odporu kovových vodičů (ELEKTRO) 1 (2008)