

Seriál: Svetivosť a iné

V poslednom diele tohtoročného seriálu sa budeme venovať oblasti fyziky, s ktorou sa stretávame v škole a pri riešení úloh do FYKOSu len veľmi zriedka – fotometrii. Fotometrické veličiny popisujú vnem ľudského oka na dopadajúce svetlo. Pri popise žiarenia vo väčšine fyzikálnych aplikácií sa používajú veličiny dané energiou, výkonom, či tokom žiarenia s príslušnými jednotkami danými kombináciou kilogramu, metru a sekundy – tzv. rádiometrické veličiny. Svetelný vnem však na týchto veličinách nezávisí jednoducho a jednoznačne. Problematika popisu svetelného zdroja sa navyše rozvinula dlho pred tým, ako bolo možné merať energiu žiarenia.

Na záver v krátkych dodatkoch spomenieme, že definícia veličín nie je jediné, čo SI systém upravuje. Taktiež sa pozrieme na niekoľko iných systémov jednotiek, ktoré sa v niektorých špecifických odboroch s výhodami používajú.

Kandela

Skúmame svetlo

Od antiky sa polia astronómie, optiky, fotometrie a teórie videnia vyvíjali súbežne. Jedným z prvých záznamov numerických hodnôt spojených s mierou svetla bolo rozdelenie hviezd do tried jasnosti Hipparchom z Nikaie v druhom storočí pred našim letopočtom. V druhom storočí jeho prácu rozšíril Ptolemaios v práci *Almagest* udávajúc hviezdnu jasnosť – magnitúdu – pre vyše tisíc hviezd. Jasnosť hviezd sa určovala porovnávaním spojeným s pohľadom na oblohu aj po vynájdení ďalekohľadu až do polovice 19. storočia.

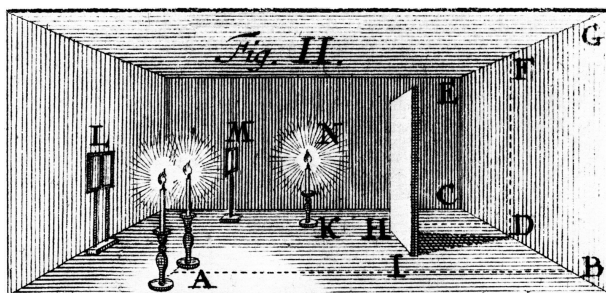
Povaha svetla a zraku sa vyvíjali súbežne – v práci *Optika* Euklides popisuje zrak pomocou z oka vystupujúceho súboru priamych lúčov, ktorými sa snaží popísať zrakový vnem a rozlíšenie. Na jeho prácu nadväzuje množstvo arabských učencov v rannom stredoveku – Alhazen v *Knihe Optiky* začiatkom 11. storočia argumentuje opačne. Telesá svietiace vlastným svetlom vytvárajú svetelné lúče, ktoré osvetľujú iné telesá. Z nich pochádzajúce sekundárne svetelné lúče následne vstupujú do ľudského oka. Popisuje ďalej priehľadnosť a farbu telies. Výrazné nové poznatky prichádzajú až z rozvojom vedy v 17. storočí. V roku 1604 Johannes Kepler vydáva dielo *Astronomiae Pars Optica* (doslova *Optická časť astronómie*), v ktorom popisuje závislosť osvetlenia ako nepriamo úmerné druhej mocnine vzdialenosti od zdroja. V roku 1704 Isaac Newton vydáva *Optiku*, v ktorej okrem iného popisuje šírenie svetla a rozklad svetla hranolom. Vysvetľuje tak farbu svetla a objektov okolo nás. Následne v roku 1729 Pierre Bouguer popisuje absorpciu svetla atmosférou v závislosti na výške nad obzorom. Prisudzuje sa mu taktiež prvé kvantitatívne fotometrické meranie, keď určil, že osvetlenie Slnkom je 300 000 krát silnejšie ako Mesiacom.

Termín fotometrie, pre popis disciplíny popisujúcej meranie množstva svetla, vytvoril Johann Heinrich Lambert v roku 1760 publikovaním knihy *Photometria*. V nej dokázal nasledovné:

- osvetlenie klesá nepriamo úmerne druhej mocnine vzdialenosti od zdroja,
- osvetlenie je úmerné kosínusu uhlu medzi kolmicou na povrch a zdrojom žiarenia,

- svetlo je tmené exponenciálne prechodom absorbujúcim médiom – Lambertov–Beerov zákon.

Jeho práca bola experimentálna využitím pomerne jednoduchých pomôcok – sviečok, tienidiel, zrkadiel, farebných skiel a pod. Ako vôbec jeden z prvých kvantifikoval chyby merania. Ďalej zmeral odrazivosti rôznych povrchov, pozoroval zmenu veľkosti zorničky na okolitom osvetlení, popísal súmrak, aditívne miešanie farieb a pričínal sa k zrodu kvantitatívnej astrofyziky. Postuloval, že zdroj žiarenia svetlo emituje v rôznych smeroch taktiež úmerne kosínu uhlu zovretého smerom žiarenia a kolmicou k povrchu. Takýto zdroj nazývame Lambertovský. Definoval tiež perfektne difúzny povrch rozptylom na ktorom má svetlo rovnakú kosínovú závislosť nezávisle na uhle dopadu – jedná sa o tzv. Lambertovský rozptyl.



Obrázek 1: Obrázok z knihy Photometria od J.H. Lamberta, znázorňujúci experimentálne usporiadanie, pomocou ktorého odvodil základné vzťahy fotometrie¹

Fotometer vizuálne

Všetky historické metódy merania svietivosti sú postavené na vizuálnom porovnávaní osvetlenia v dvoch rôznych miestach. Ľudské oko je schopné detegovať rozdiel osvetlenia dvoch plôch na úrovni okolo 1% a vo veľkom rozsahu intenzít osvetlenia je táto relatívna presnosť merania rovnaká. Podobne ako sluch, či iné zmyslové vnemy je pozorovaná odozva lineárna v logaritme pôvodnej veličiny – tzv. Weberov zákon. Keďže ide o porovnávacie meranie potrebujeme okrem detektoru (oka experimentátora) aj zdroj svetla o štandardnej intenzite, tzv. štandardnú sviečku v ktorej násobkoch sa svietivosť iných zdrojov merala. Tento štandard bol v každej krajine iný. Vo Veľkej Británii používali sviečku z voskovitého materiálu z mozgovej dutiny vorvaňov o hmotnosti 76 gramov horiacu rýchlosťou 7,8 gramu za hodinu. Vo Francúzsku používali Carcelovu lampu spaľujúcu repkový olej. V germánskych krajinách (politicky vzaté, teda aj v Čechách a na Slovensku) sa ako štandard využívala Hefnerova lampa spaľujúca amyl acetát (pentylester kyseliny octovej) s 40 mm vysokým plameňom. Jeden spoločný medzinárodný štandard sa začal používať až v polovici 20. storočia.

Ako však prebiehalo samotné meranie? V zatemnenej miestnosti s čiernymi, svetlo absorbujúcimi stenami a vybavením sa umiestnil meraný a štandardný zdroj svetla a fotometer – prístroj slúžiaci na porovnanie. Zmenou vzájomnej polohy zdrojov a fotometra sa experimentátor presvedčil o tom, že osvetlenie od oboch zdrojov je rovnaké a následne výpočtom zo zmeraných uhlov a vzdialeností určil svietivosť meraného zdroja. Fotometrov poznáme niekoľko.

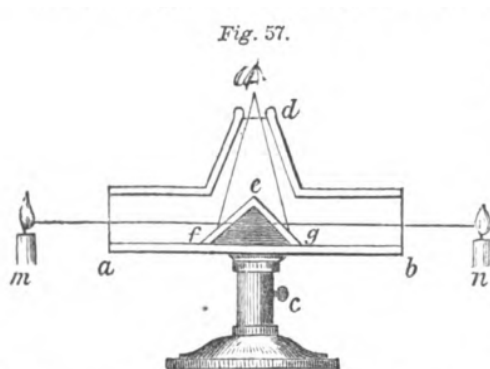
¹<https://en.wikipedia.org/wiki/Photometria>

Rumfordov fotometer pozostáva z nepriehľadnej tyče a bieleho tienidla. Zdroje svetla sa snažíme umiestniť tak, aby oba tiene, ktoré tyč vrhá, boli rovnako tmavé a uhly zovreté medzi tienidlom tyčou a zdrojmi boli taktiež rovnaké, len na opačnej strane voči kolmici.

Ritchieho fotometer (na obrázku 2) porovnáva osvetlenie dvoch plôch (f , g), ktoré sú osvetlené z opačných strán štandardným a meraným zdrojom. Pri meraní upravujeme vzdialenosť zdrojov od fotometra.

Bunsenov fotometer pozostáva z papierového tienidla s masťou/olejovou/voskovou škvrnou orientovaného kolmo na spojnicu medzi zdrojmi svetla. Vzdialenosť zdrojov od spojnice sa upravuje, kým nie je škvrna rovnako svetlá ako tienidlo. Keďže škvrna časť svetla rozptyľuje a prepúšťa, tak ak je osvetlenie zadnej strany vyššie ako prednej, je škvrna svetlejšia ako zvyšok tienidla a naopak.

Alternatívou Bunsenovho je Botheho tangenty fotometer. Fotometer sa nenachádza na spojnici, ale svojou polohou zvierá s lampami pravý uhol. Poloha lúčov sa nemení, pri meraní sa otáča rovinou tienidla fotometra. Osvetlenie sa tak nebalansuje vzdialenosťami lúčov, ale uhlami dopadu svetla na tienidlo.



Obrázek 2: Ritchieov fotometer²

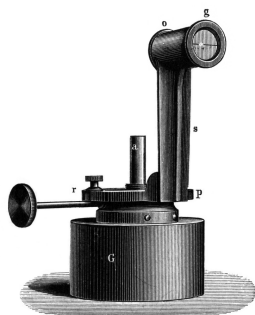
Na inom princípe bol založený Zollnerov fotometer používaný v astronómii – tu sa svetlo kerozínovej lampy optickou sústavou obsahujúce dvojicu Nikolových hranolov prenášalo do objektívu ďalekohľadu. Pozorovateľ tak v ďalekohľade porovnával jasnosť hviezd a obrazu lampy pričom otáčaním Nikolových hranolov menil intenzitu svetla lampy. Nikolov hranol je tvorený dvojicou hranolov z islandského kalcitu – dvojlomného materiálu – tak, aby prepustené svetlo bolo rovinné polarizované. Ak takéto svetlo dopadne na druhý Nikolov hranol pootočený o uhol α oproti prvému, podľa Malusovho zákona platí

$$I = I_0 \cos^2 \alpha .$$

Komplikovanejším usporiadaním dvojlomných materiálov a disperziou svetla v nich sa dá navyše meniť farba prepusteného svetla, čo nám umožňuje porovnávať svetlá o rovnakej farbe. Porovnávanie osvetlení zdrojmi rôznej farby je totiž značne problematické.

²<https://en.wikipedia.org/wiki/Photometer>

Svietivosť je smerovo závislá veličina. Meraním vo viacerých smeroch sme schopný určiť smerovú závislosť svetivosti. K tomuto účelu slúži goniofotometer umožňujúci meranie z každého smeru. Toto meranie je dôležité najmä v prípade smerových zdrojov svetla ako napríklad LED diód, či automobilových svetlomietov. Zmeraním svetivosti do každého smeru v priestore sme schopný určiť celkový svetelný tok zdrojom vyžarovaný. Praktickejším spôsobom je využitie integrujúcej sféry – dušej gule pokrytej difúznym odrazovým náterom bielej farby, ktoré dopadajúce svetlo Lambertovsky rozptyľuje. Meriame pritom osvetlenie na výstupnej štrbine zo sféry, ktorá svetlo emitované zdrojom smerovo „zamieša“ a „rozmaže“ množstvom difúzných odrazov od jej stien.



Obrázek 3: Hefnerova lampa³



Obrázek 4: Integrujúca sféra⁴

Svetlo v každej domácnosti

Z rozširovaním plynových lúčok používaných ako pouličné osvetlenie a osvetlenie fabriek v čase industrializácie začiatkom 19. storočia došlo k potrebe merania svetivosti aj mimo čisto vedeckú sféru. Keďže sa jednalo o platenú službu, poskytovatelia boli zaviazaní dodávať lúčok o danej svetivosti a zákazník vo veľkých mestách si obvykle mohol vybrať medzi viacerými spoločnosťami. Lúčok spaľujúce najmä vodný plyn (zmes oxidu uhoľnatého a vodíka vytvoreného reakciou vodnej pary a uhlia za vysokej teploty) boli hlavným zdrojom svetla až do príchodu elektrickej oblúčkovvej lúčok na konci storočia a neskôr žiarovky. Štandard založený na pôvodných štandardných sviečkach – pomerne slabých zdrojoch tvoriacich svetlo spaľovaním tukov – tak prestal byť dostačujúci.

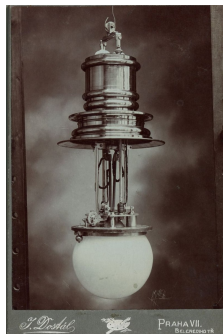
Snaha oprostiť definíciu štandardnej sviečky a vytvorenie medzinárodnej definície viedla k využitiu vlastností žiarenia absolútne čierneho telesa. Už v roku 1881 Jules Violle navrhol vytvoriť definíciu použitím platiny na bode tuhnutia. Problematická však bola presná realizácia, keďže nečistoty na povrchu a prímеси menia ako bod tuhnutia, tak aj emisivitu povrchu takéhoto štandardu, pričom znižujú presnosť realizácie až na desiatky percent. Riešením tohto problému bolo ako zdroj použiť iné teleso ponorené do platiny. V praxi sa najviac osvedčila dutina z oxidu

³<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hefnerlampe.png>

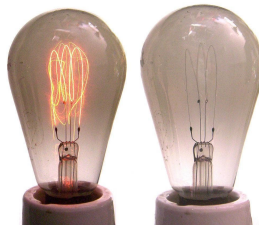
⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Integrating_sphere

⁵https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ocenaskova_Obloukova_Lampa.jpg

⁶<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbonfilament.jpg>



Obrázek 5: Oblúčková lampa Ludvíka Očenáška⁵



Obrázek 6: Žiarovka s uhlíkovým vláknom, na ktorej je pozorovateľné sčernenie žiarovky⁶

tória slúžiaca ako aproximácia zdroja s vlastnosťami absolútne čierneho telesa.⁷ Na finálny návrh z roku 1937 bola definícia „novej sviečky“ prijatá v roku 1946; o dva roky neskôr bola táto jednotka premenovaná na kandelu. Spresnená definícia z roku 1967 znie nasledovne:

Kandela je svetivosť kolmo na povrch o veľkosti $1/600\,000$ štvorcového metra absolútne čierneho telesa na teplote tuhnutia platiny za tlaku $101\,325$ Pa.

Táto definícia má však využitím vyššie zmienenej realizácie presnosť na úrovni $3 : 10^3$, výrazne nižšiu ako bolo koncom 20. storočia potrebné. Toto je očividné najmä v porovnaní s definíciami iných jednotiek.

Fotometria dnes

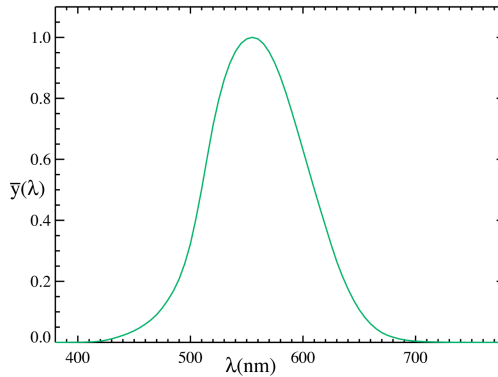
So zvyšujúcou presnosťou merania špecifických rádiometrických veličín – teda množstiev energie elektromagnetického žiarenia o určitých vlnových dĺžkach – bolo možné upustiť od merania fotometrických veličín klasickými vizuálnymi metódami a platinového štandardu. Tento prechod tak umožňuje zlepšenie presnosti merania o niekoľko rádov oprostím od reálneho zrakového vnemu experimentátora. Na prevod rádiometrických veličín na fotometrické (matematicky popísané nižšie) bolo preto potrebné určiť citlivosť ľudského oka na rôzne vlnové dĺžky svetla. Prvé kroky týmto smerom boli vykonané v 20. rokoch minulého storočia publikáciou Medzinárodnej komisie pre osvetľovanie CIE 1924 fotopickou funkciou $V(\lambda)$, citlivosti denného videnia na svetlo rôznej vlnovej dĺžky. Táto oblasť biofyziky sa vyvíja doposiaľ napr. prácami Stockmana a Sharpa spresňujúcimi $V(\lambda)$ a popisom vplyvu farebnej adaptácie, či meraním farebnej citlivosti oka v iných podmienkach. Existujú preto funkcie farebnej citlivosti aj pre nočné (skotopické) videnie, či pre ľudí trpiacich niektorou z foriem farbosleposti.

Ústav pre miery a váhy, teda aj SI systém, priamo definuje len škálovaciu konštantu prevodnej závislosti a nie jej podrobný priebeh. Používa pri tom monochromatický zdroj svetla:

Kandela, symbol cd, je SI jednotka svetivosti. Je definovaná fixovaním číselnej hodnoty K_{cd} žiarivosti monochromatického žiarenia o frekvencii $540 \cdot 10^{12}$ Hz na hodnotu

⁷Pre podrobný popis skoro storočného vývoju metodológie vedúcej k novej definícii si môžete prečítať <https://technology.matthey.com/content/journals/10.1595/003214086X3028495>.

683 vyjadrenej v jednotkách $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3$, kde kilogram, meter a sekunda sú definované pomocou h , c a $\Delta\nu_{\text{cs}}$.



Obrázek 7: Krivka pomernej svetelnej účinnosti⁸

Dnešné fotometre obvykle merajú osvetlenie (sú to teda luxmetre) použitím polovodičového detektora elektromagnetického žiarenia. Tento detektor ale meria rádiometrický tok vážený jeho spektrálnou citlivosťou. Aby bolo možné meranú hodnotu prepočítať na osvetlenie je nutné pred detektor vložiť (farebný) filter tak, aby spolu s citlivosťou detektora bola výsledná citlivosť rovnaká ako citlivosť ľudského oka. Meranú hodnotu je potom možné previesť na osvetlenie pre násobením konštantou určenou z kalibračného merania. Dnes sa však fotometria práve ako dôsledok pokroku rádiometrických meracích prístrojov vo fyzike príliš nepoužíva. Meranie interakcie svetla s látkou už totiž neprebíha pomocou oka. Dá sa preto povedať, že sa karta medzi klasickou fotometriou a ostatnými fyzikálnymi disciplínami obrátila. Vo viacerých odboroch fyziky sa stále stretujeme s pojmom fotometria ako meranie vlastností svetla. Nejedná sa však o fotometriu danú ľudským okom ale iným použitým detektorom a obvykle sa takto merané hodnoty dajú previesť na hodnoty rádiometrických veličín.

S fotometriou je úzko spätá aj kolorimetria skúmajúca ľudské vnímanie farieb fungujúca podobne, ale s krivkami citlivosti pre jednotlivé druhy čapíkov citlivých v červenej, zelenej a modrej oblasti a následne prechodom do niektorého z farebných systémov Medzinárodnej komisie pre osvetľovanie. Význam má dnes fotometria a kolorimetria najmä v architektúre pri nutnosti plniť normy osvetlenia a ďalej v reprodukcii obrazu vo filmovej technike a grafike a stretujeme sa s ňou pri farebnej kalibrácii monitorov a tlačiarň.

Odvođené jednotky

Vzhľadom na to, že na fotometriu na stredných školách obvykle pred maturitami neostáva čas, predstavme si dôkladnejšie systém fotometrických veličín a s nimi spojených jednotiek. Hlavnou jednotkou je svetivosť (obvykle značená I) meraná v kandelách (cd) udávajúca intenzitu svetelného toku v danom smere na jednotku priestorového uhla. Svetelný tok Φ meraný v lúmenoch

⁸<https://cs.wikipedia.org/wiki/Kandela>

(lm) vyjadruje množstvo vyžiarenej/prenesenej svetelnej energie za jednotku času (s prihladením na citlivosť ľudského oka). S využitím definície kandely a pomernej svetelnej účinnosti oka $V(\lambda)$ vieme previesť monochromatický svetelný tok Φ_s a žiarivý tok Φ_z pomocou vzťahu

$$\Phi_s(\lambda) = K_m V(\lambda) \Phi_z(\lambda),$$

kde $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Pre svetlo o spojitom spektre je nutné tento vzťah integrovať – vo výsledku sa teda jedná o vážený priemer spektrálneho toku žiarenia vážený citlivosťou oka a pre násobený definičnou konštantou. Pre svetivosť zdroja potom máme vzťah

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega},$$

kde $d\Phi$ je svetelný tok smerujúci do priestorového uhla o veľkosti $d\Omega$. Kandle tak v rádiometrických veličinách odpovedá žiarivosť ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$). Od svetelného toku je odvodená aj svetelná energia Q_V

$$\Phi = \frac{dQ_V}{dt}$$

s jednotkou ($\text{lm} \cdot \text{s}$) obdobná energii žiarenia s jednotkou joule.

Zatiaľ čo svetelný tok popisuje zdroj žiarenia, osvetlenie E je dané ako svetelný tok dopadajúci na jednotku plochy

$$E = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Klesá teda nepriamo úmerne druhej mocnине vzdialenosti od zdroja a priamo úmerne kosínu uhla medzi smerom dopadajúceho žiarenia a normálou k ploche, na ktorej osvetlenie určujeme. Jednotkou osvetlenia je lux $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2}$. Podobnou veličinou je svetlenie M popisujúce svetelný tok emitovaný zdrojom svetla na jednotku jeho plochy; tu sa obvykle používa miesto luxu priamo jednotka $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$. Vo fotografii sa stretne aj so svetelnou expozíciou H_V danou ako množstvom svetla, ktoré dopadne na fotografický film za čas t , počas ktorého snímok exponujeme

$$H_V = \int E dt.$$

Príbuznou veličinou svetlenia je jas L , ktorý popisuje množstvo svetla vyžiarené jednotkou plochy zdroja do daného priestorového uhla (smeru)

$$L = \frac{dI}{dS \cos \alpha},$$

kde α je uhol medzi normálou plošky a smerom žiarenia. Jas má jednotku $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ a je kvantitatívnym popisom toho, čo by sme v občianskom živote nazvali jasom zdroja svetla.

Čo nám ešte SI prináša?

Okrem definícií siedmych základných jednotiek pomocou siedmych konštánt $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, c , h , N_A , k_B , e , K_{cd} sú v SI systéme zavedené aj jednotky na meranie uhlov. Základnými jednotkami rovinových a priestorových uhlov sú radián $1 \text{ rad} = 1 \text{ m}/1 \text{ m}$ daný ako podiel dĺžky kruhového oblúka uhlom vytatého a jeho polomeru, a steradián $1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/1 \text{ m}^2$ daný podielom vytatej plochy sférickej výseče a druhej mocniny jej polomeru. Tieto jednotky majú v SI systéme rozmer 1 – sú teda bezrozmerné, ale v niektorých aplikáciách sa uvádzajú, aby sa predišlo zmäteniu –

Tabuľka 1: Predpony systému SI

quetta	ronna	yotta	zetta	exa	peta	tera	giga	mega	kilo	hekto	deka
Q	R	Y	Z	E	P	T	G	M	k	h	da
10^{30}	10^{27}	10^{24}	10^{21}	10^{18}	10^{15}	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1
quekto	ronto	yokto	zepto	atto	femto	piko	nano	mikro	mili	centi	deci
q	r	y	z	a	f	p	n	μ	m	c	d
10^{-30}	10^{-27}	10^{-24}	10^{-21}	10^{-18}	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}

napríklad pri jednotke uhlovej rýchlosti $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$, či v prípade už spomínaného lúmenu $\text{cd}\cdot\text{sr}$. Často sa však stretávame s vyjadrením týchto uhlových mier v stupňoch, resp. štvorcových stupňoch. Pre prevod využívame definíciu uhlového stupňa $360^\circ = 2\pi \text{ rad}$ využitím plného kruhu. Na rozdiel od jednotiek SI sa stupeň nedelí v násobkoch 10, ale $1^\circ = 60'$ na uhlové minúty a $1' = 60''$ uhlových sekúnd.

SI ďalej prichádza aj s vlastným systémom dielov a násobkov základných jednotiek zavedených na násobkoch desiatky. Využívajú sa pritom predpony podľa tabuľky 1 pripojené k názvom a značkám jednotiek – napríklad $1 \text{ nm} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ je nanometer. Z historických dôvodov je jednotka kilogram sama tvorená ako tisícnásobok gramu, pre jej násobky sa používajú tvary odvodené predponou od gramu, teda $10^{-6} \text{ kg} = 1 \text{ mg}$ a nie $1 \mu\text{kg}$.

Nakoniec SI upravuje aj používanie jednotiek a ich typografiu. Názvy jednotiek začínajú malým písmenom, násobkové predpony sa pripájajú bez použitia pomlčky a tvoria jedno slovo. Každá hodnota fyzikálnej veličiny je tvorená ako súčin jej číselnej hodnoty a jednotky, v ktorej je vyjadrená, ako napríklad $m = 1 \text{ kg}$. Označenie veličín pritom využíva kurzívu, označenie jednotiek v obyčajnom reze písma. Medzi číselnou hodnotou a jednotkou sa používa krátka medzera, pričom číselná hodnota sa uvádza ako prvá. Pri použití sa súčin medzi číselnou hodnotou a jednotkou chová podľa matematických pravidiel. Ak chceme vyjadriť hodnotu veličiny a chybu jej určenia, musíme použiť zátvorky $m = (1.00 \pm 0.02) \text{ kg}$. Inou možnosťou je zápis $m = 1,00(2) \text{ kg}$, kde hodnota v zátvorke uvádza chybu na posledných cifrách uvedenej hodnoty. Podobne v tabuľkách a grafoch, kde vynášame len číselnú hodnotu je nutné uviesť použité jednotky, obvykle formou podielu m/kg . Podobne platia aj pravidlá pre formátovanie číselných hodnôt, napríklad $-0,123\ 456\ 789\ 0$, kde v češtine a slovenčine používame desatinnú čiarku a ako oddeľovač tisícov medzeru. Pre násobenie a delenie jednotiek je prípustné hociktoré z ab , $a\ b$, $a \times b$, $a \cdot b$, a/b , $\frac{a}{b}$, ab^{-1} atď. V prípade, ak je fyzikálna veličina bezrozmerná, využíva sa len číselná hodnota bez použitia jednotky, nie je teda možné využiť predponu a rád sa musí vyjadriť číselne násobením príslušnou mocninou desiatich. V niektorých prípadoch je však vhodné použiť príslušnú jednotku, ako napríklad rotácia Zeme sa spomaľuje o $23 \mu\text{s}/\text{rok}$.

Iné systémy jednotiek

Okrem klasických systémov jednotiek sa vo fyzike môžeme stretnúť aj s inými systémami, obvykle špecifickými pre danú aplikáciu. V astrofyzike sa obvykle stretávame s jednotkami založenými na orbite Zeme okolo Slnka – astronomickej jednotke⁹ (a od nej odvodenej jednotke parsek¹⁰), hmotnosti Slnka $1 M_\odot$ a dňa rovnému $1 \text{ d} = 86\ 400 \text{ s}$, kde sa využíva SI sekunda. Jedná sa o prakticky výhodné jednotky hneď z viacerých pohľadov. Je výrazne jednoduchšie

⁹Pôvodne bola definovaná ako veľká polos dráhy ťažiska sústavy Zem-Mesiak okolo Slnka, čo bolo neskôr niekoľkokrát spresnené. V roku 2012 bola finálne naviazaná na SI ako $1 \text{ au} = 149\ 597\ 870\ 700 \text{ m}$.

¹⁰Parsek sa používa pri vzdialenostiach hviezd, je definovaný pomocou paralaktickej metódy merania ako vzdialenosť, v ktorej 1 au vytína uhol jednej oblúkovej sekundy, tj. $1 \text{ pc} = 648\ 000/\pi \text{ au}$

porovnávať hviezdy a planéty k Slnku a Zemi bez neustáleho prepočítavania čísel s veľkými rádmi. Obvykle je dôležité najmä pomerné porovnanie hodnôt meraných veličín. Ďalej bol tento systém využívaný historicky, keď vzdialenosť Zeme od Slnka nebola známa s vysokou presnosťou. Dodnes platí, že hmotnosť Slnka je presnejšou jednotkou hmotnosti vo vesmíre ako kilogram. Meranie hmotnosti totiž prebieha pomocou pôsobenia gravitačnej sily na okolité telesá, pričom hodnotu gravitačnej konštanty $G = 6,674\,30(15) \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$ poznáme s menšou presnosťou ako hodnotu tzv. štandardného gravitačného parametra $GM_{\odot} = 1,327\,124\,400\,42(10) \cdot 10^{20} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-2}$. Jednou z ďalších výhod použitia takýchto jednotiek je zjednodušenie výpočtov použitím tretieho Keplerovho zákona – použitím hmotnosti Slnka, astronomickej jednotky a roka ako jednotiek je možné využiť vzťah v podobe

$$\frac{a^3}{P^2} = M + m.$$

V špeciálnej relativite sa stretne s tzv. geometrizovanými jednotkami. Volbou rýchlosti svetla a gravitačnej konštanty rovnými jednej sa nám zjednodušia rovnice – tieto veličiny sa v nich nebudú vyskytovať a zaujímavé javy budú nastávať pri veličinách nadobúdajúcich hodnoty v ráde jednotiek. Ak navyše zavedieme jednotkové hodnoty Boltzmannovej konštanty, redukovanej Planckovej konštanty a permitivity vákuua dostaneme jedno z možných vyhotovení tzv. Planckových jednotiek. Podobne ako pri zavádzaní elektrických jednotiek si aj tu treba dať pozor na prípadné iné definície využívajúce rôzne $n\pi$ násobky týchto veličín. Planckove jednotky majú najširšie využitie v teoretickej fyzike pri teóriách snažiacich sa súčasne popísať všetky základne silové interakcie – tzv. teórie všetkého. Jednotkové hodnoty veličín totiž narážajú na rôzne „bariéry“ fyziky, či už kvantovej, alebo relativistickej podvahy.

V atómovej a molekulárnej fyzike sa používajú tzv. Hartreeho jednotky zavedením jednotkovej hodnoty redukovanej Planckovej konštanty \hbar , náboja a hmotnosti elektrónu e , m_e a $4\pi\epsilon_0$ – násobku permitivity vákuua. V týchto jednotkách má tak polomer prvej hladiny atómu vodíka Bohrovho modelu hodnotu jedna a slúži ako jednotka dĺžky

$$1 a_B = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{m_e e^2}.$$

Podobne aj dvojnásobok energie základnej hladiny atómu vodíka slúži ako jednotka, ktorá nesie meno Hartree

$$1 E_h = \frac{\hbar^2}{m_e a_B^2}.$$

S týmito jednotkami ste sa mohli stretnúť v minuloročnom seriáli venovanom výpočtovej fyzikálnej chémii.

V časticovej fyzike sa stretne s jednotkami založenými na jednotke energie elektónvolt – energii, ktorú nadobudne elektrón urýchlením napätím jeden volt $1 \text{ eV} = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, a rýchlosti svetla.¹¹ Napríklad hmotnosť Higgsovoho bozónu sa uvádza ako $125,11 \pm 0,11 \text{ GeV}\cdot\text{c}^{-2}$. V jadrovej fyzike pri popise silnej jadrovej interakcie je výhodné použiť jednotky dané fixovaním hodnôt hmotnosti protónu, rýchlosti svetla a redukovanej Planckovej konštanty. Všeobecne pre popis veličín odvodených od n základných jednotiek potrebujeme n vhodných definičných konštánt, ktoré volíme podľa potreby daného odboru.

Svoje jednotky majú aj iné vedecké disciplíny všade tam, kde je potrebné nejakú vlastnosť kvantitatívne vyjadriť. V informatike sa tak používa bit ako jednotka množstva informácie, či

¹¹Poprípade aj Boltzmannovej a redukovanej Planckovej konštanty.

jej násobok byte $1\text{B} = 8\text{b}$. Vo farmakológii sa pre popis biologickej aktivity látok používajú medzinárodné jednotky (I.U.). Stretneme sa s nimi pri popise množstva vitamínov, hormónov, liečiv atď. miesto ich hmotnosti, keďže výsledný účinok na človeka popísaný týmito jednotkami závisí na forme a spôsobe podania. Navyše kvalitatívne rovnaký farmakologický účinok môžu mať rôzne chemické látky, či zmesi s rôznymi molekulárnymi hmotnosťami. Mieru 1 U.I. definuje pre jednotlivé látky Výbor pre biologickú normalizáciu Svetovej zdravotníckej organizácie. Taktiež sa stretneme s obdobnými jednotkami v bežnejšom živote – so Scovillovými jednotkami pri meraní pálivosti alebo so štandardnou dávkou alkoholu. V neposlednom rade existuje rada jednotiek používaných v ekonomike a iných humánnych odvetviach odvodených od človeka, ako napríklad človekohodina pre mieru odvedenej práce, človekonoc v hoteliérstve, mikromort v poisťovníctve, či ekvivalentným obyvateľom v čistení odpadových vôd.¹²

Záver

Na záver by som chcel poďakovať všetkým riešiteľom, ktorý to so mnou vydržali až do konca aj napriek mojej nedochvilnosti. Verím tomu, že ste si mali možnosť osviežiť znalosti z rôznych odvetví fyziky a často sa aj niečomu priučiť. Aj pre mňa samotného bolo veľa z prezentovaných informácií nových a najmä popisy funkcie jednotlivých prístrojov som musel niekedy aj pár dní vstrebávať, kým som ich bol schopný pochopiť a podať v (dúfam) zrozumiteľnej forme. Na úplný záver by som tak chcel poďakovať všetkým technikom a inžinierom, bez ktorých detailných znalostí a vytrvalej práce by fyzikálny výskum ako ho poznáme nebol možný.

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

¹²Úsmevným „vrcholom“ ľudskej potreby veci kvantifikovať je jednotka penrig – akronym PENis RIGidity popisujúci mieru stoporenia.