

## Seriál: Spektroskopia v astronómii

Po návšteve malých škál sa v poslednom diele tohtoročného seriálu presunieme na škály veľké – do vesmíru. Znalosti o vzdialených telesách v astronómii získavame až na pár výnimiek<sup>1</sup> pozorovaním elektromagnetického žiarenia. V nasledujúcom texte sa budeme venovať jeho úzkej časti medzi blízkou ultrafialovou a infračervenou oblasťou, kde sa využívajú techniky, s ktorými ste sa mohli stretnúť v optike na hodinách fyziky. Konkrétne sa budeme venovať spektroskopii – technike, ktorá popisuje závislosť intenzity svetla od vlnovej dĺžky.

### Čím meriame?

Prístroj, ktorý rozloží svetlo na spektrum a umožní jeho záznam, sa nazýva spektrograf. Pozorované objekty sú ale v astronómii slabé, preto je najprv nutné sústrediť do spektrografu svetlo ďalekohľadom. Základnými parametrami ďalekohľadu sú

- priemer objektívu  $D$ , určujúci jednak množstvo svetla, ktoré sme schopní nazbierať; a taktiež uhlové rozlíšenie  $\Psi$  prístroja,
- ohnisková vzdialenosť  $f$  nepriamo určujúca svetelnosť, zväčšenie a zorné pole prístroja.

Pre uhlové rozlíšenie pri pozorovaní na vlnovej dĺžke  $\lambda$  je známe Rayleighovo kritérium

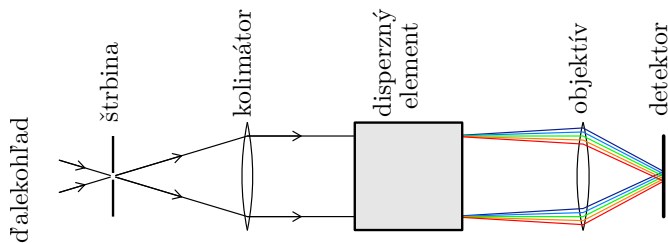
$$\Psi = 1,22 \frac{\lambda}{D}.$$

Svetelnosť ďalekohľadu, podobne ako objektívu fotoaparátu, sa udáva vo forme  $f/\#$ , kde číslo  $\# = f/D$ . Obvyklé sú hodnoty  $f/4$  až  $f/20$ . Svetelnosť v princípe popisuje rozbiehavosť zväzku lúčov dopadajúcich do ohniskovej roviny – čím menšia je, tým je zväzok širší a konštrukcia prístroja technicky náročnejšia (dostávame sa ďalej od paraxiálnej aproximácie).

Svetlo z pozorovaného objektu v ohniskovej rovine (kam by sme umiestnili čip kamery, ak by sme chceli oblohu odfotografovať) dopadá na štrbinu, ktorou vyberieme konkrétny zdroj svetla, ktorého spektrum chceme zmerať. Prechádzajúci rozbiehavý zväzok následne kolimujeme (zvyčajne odrazom na parabolickom zrkadle, možné je však použiť aj spojnú šošovku<sup>2</sup>) na rovnobežný lúč. Ten je disperzným elementom rozložený na spektrum – pre každú vlnovú dĺžku dostaneme súbor rovnobežných lúčov, ktorých smer je závislý práve od vlnovej dĺžky. Na záver je nutné získaný zväzok zobrazit na čip kamery, či už ďalším zrkadlom (v tom prípade hovoríme o druhom kolimátore), alebo šošovkou (tu pre zmenu hovoríme o objektíve). Dôležité je uvedomiť si, že pre každú vlnovú dĺžku je spektroskop zobrazujúci optický prístroj. Štrbina spektrografu sa preto zobrazí na čipe ako úzky obdĺžnik. Užšia štrbina zvyšuje rozlíšenie prístroja za cenu menšieho množstva svetla. Mnoho moderných prístrojov namiesto štrbiny využíva optické vlákno, ktorého jeden koniec je v ohniskovej rovine ďalekohľadu a druhý v optickom laboratóriu na vstupe do spektrografu. Výhodou tak je, že spektrograf nie je vystavený vonkajším podmienkam a môže byť tepelne a mechanicky lepšie stabilizovaný, či dokonca umiestnený vo vákuu.

<sup>1</sup>Napríklad gravitačné vlny a časticové žiarenie.

<sup>2</sup>V praxi sa skoro nepoužíva, zrkadlá sú na výrobu jednoduchšie než šošovky so správnym tvarom a navyše nemajú farebnú chybu.



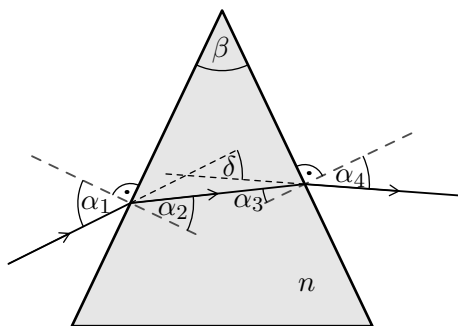
Obrázek 1: Schéma spektrografu.

### Optický hranol

Historicky prvými disperznými prvkami boli sklenené hranoly, pomocou ktorých napr. Isaac Newton demonštroval, že slnečné svetlo sa skladá zo spektra farebných zložiek, ktoré sú ďalej nedeliteľné a dajú sa zložiť späť na biele svetlo. Svetelný lúč dopadajúci na hranol pod uhlom  $\alpha_1$  sa lomí ku kolmici, prechádza hranolom zo skla s indexom lomu  $n$  a vrcholovým uhlom  $\beta$  a z hranolu vychádza po lome od kolmice pod uhlom  $\alpha_4$  od kolmice. Nás zaujíma odchýlenie lúča od pôvodného smeru  $\delta$ . Pre lom svetla na rovinnom rozhraní platí Snellov zákon

$$\sin \alpha_1 = n \sin \alpha_2 ,$$

$$n \sin \alpha_3 = \sin \alpha_4 .$$



Obrázek 2: Nákres hranola.

Pre uhly  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  a  $\beta$  máme z trojuholníka tvoreného vrcholom hranola a oboma bodmi dopadu  $\beta + (90^\circ - \alpha_2) + (90^\circ - \alpha_3) = 180^\circ$ , teda  $\beta = \alpha_2 + \alpha_3$ . Podobne máme pre odchýlenie lúča od pôvodného smeru, v ktorom dopadol na hranol (teda deviáciu lúča)

$$\delta = \alpha_1 - \alpha_2 - (\alpha_3 - \alpha_4) = \alpha_1 + \alpha_4 - \beta .$$

Postupným skombinovaním týchto vzťahov dostaneme

$$\delta = \alpha_1 - \beta + \arcsin(n \sin \alpha_3) = \alpha_1 - \beta + \arcsin\left(n \sin\left(\beta - \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_1}{n}\right)\right)\right) .$$

Pre danú hodnotu  $\beta$  je deviácia veľká pri kolmom dopade, následne sa znižuje a nadobúda minimum pre situáciu s  $\alpha_1 = \alpha_4 = \alpha_c$ ,  $\alpha_2 = \alpha_3$  a potom opäť rastie. Z praktických dôvodov sa používa konfigurácia s minimálnou deviáciou – v ostatných prípadoch je totiž kruhový prierez vstupného kolimovaného valcového zväzku zmenený na elipsovité. V prípade nižších uhlov dopadu je výsledný zväzok stlačený v smere disperzie, čím dostaneme menšie rozlíšenie vplyvom konečnej veľkosti štrbiny, ktorej obraz na detektore sa v rovnakom pomere rozširuje. Mohlo by sa zdať, že uhly väčšie ako  $\alpha_c$  by rozlíšenie zvýšili – skutočne to tak je, ale za cenu väčšieho polomeru objektívovej šošovky a vyšších svetelných strát nechceným čiastočným odrazom svetla na prvom rozhraní.<sup>3</sup> Pre uhol dopadu v prípade minimálnej deviácie platí

$$\alpha_2 = \frac{\beta}{2} \Rightarrow \alpha_c = \arcsin\left(n \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right).$$

Pre deviáciu máme

$$\delta = 2(\alpha_1 - \alpha_2) = 2 \arcsin\left(n \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) - \beta.$$

Pre hranol ako disperzný element je dôležitá práve závislosť odchýlky od indexu lomu. Ten totiž závisí od vlnovej dĺžky, pričom pre sklo približne platí

$$n \approx A + \frac{B}{\lambda^2},$$

kde  $A$  a  $B$  sú materiálové konštanty. Pre popis disperzie sú dôležité dva parametre: uhlová disperzia

$$D_\lambda = \frac{d\delta}{d\lambda} = \frac{d\delta}{dn} \frac{dn}{d\lambda} = \frac{2 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}} \frac{dn}{d\lambda} \approx - \frac{4 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)}} \frac{B}{\lambda^3}$$

a rozlišovacia schopnosť  $R$  určená ako

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda},$$

kde  $\Delta\lambda$  je vzdialenosť dvoch štruktúr, ktoré ešte dokážeme v oblasti spektra okolo  $\lambda$  rozlíšiť. Predstavme si zväzok lúčov prechádzajúci hranolom v konfigurácii minimálnej deviácie o šírke  $h$  v hranole. Ak jeden krajný lúč bude prechádzať vrcholom hranola, tak  $h$  je výška hranola. Medzi spodnými krajnými lúčmi je pre dve vlnové dĺžky  $\lambda$ ,  $\lambda + \Delta\lambda$  (ktoré chceme rozlíšiť) rozdiel optických dráh

$$\Delta s = 2n(\lambda + \Delta\lambda) h \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) - 2n(\lambda) h \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{dn}{d\lambda} b \Delta\lambda,$$

kde  $b$  je dĺžka základne hranola. Lúče vieme rozlíšiť, ak je tento rozdiel aspoň jedna vlnová dĺžka.<sup>4</sup>

Preusporiadaním tak dostaneme

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = b \frac{dn}{d\lambda} \approx b \frac{2B}{\lambda^3}.$$

<sup>3</sup>Pomer odrazenej a prepustenej svetelnej intenzity na rozhraní dvoch prostredí je daný Fresnelovými vzorcami.

<sup>4</sup>Existuje niekoľko rôznych kritérií rozlíšenia; vo všeobecnosti by bolo nutné vypočítať priebeh intenzity monochromatického zväzku vychádzajúceho z hranola. Náš výpočet tak predstavuje iba zjednodušený prístup, ktorý však dáva (až na prípadný číselný koeficient blízky 1) správny výsledok.

Typické hodnoty rozlišovacej schopnosti hranola sú vysoké desiatky až vysoké jednotky tisícok. Všimnime si, že rozlišovacia schopnosť hranola je silne závislá od vlnovej dĺžky – väčšia je pre krátke vlnové dĺžky v modrej oblasti.

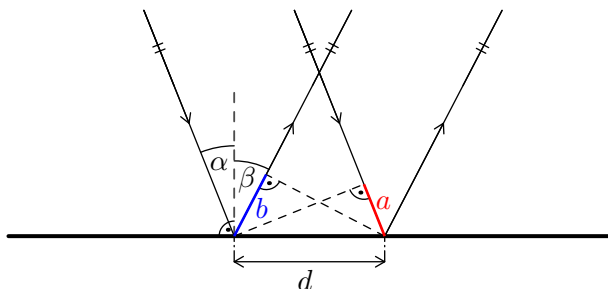
### Optická mriežka

Optická mriežka je obvykle rovinná plocha s periodicky sa opakujúcimi rovnobežnými priamkami, vrypami alebo inou štruktúrou. Mriežky môžu byť buď transmisné, keď sú „vryp“ štrbinami; alebo reflexné, keď je odrazivá plocha zvyčajne pílového profilu so vzdialenosťou  $d$  medzi zubmi. Vzdialenosť periodicky sa opakujúcich štruktúr sa nazýva mriežková konštanta. Uvažujme dvojicu rovnobežných monochromatických lúčov dopadajúcich na mriežku pod uhlom  $\alpha$  v bodoch vzdialených  $d$ , ktoré sú následne odrazené pod uhlom  $\beta$ . Odrazené lúče budú konštruktívne interferovať, ak ich dráhový rozdiel bude celočíselným násobkom vlnovej dĺžky

$$m\lambda = a - b = d(\sin \alpha - \sin \beta), \quad m \in \mathbb{Z}.$$

Tento vzťah sa nazýva mriežková rovnica. Často sa mriežky používajú v tzv. Litrowovej konfigurácii, kde je smer dopadajúcich a odrazených lúčov zhodný ( $\alpha = -\beta$ ), vďaka čomu dostaneme jednoduchší vzťah

$$m\lambda = 2d \sin \alpha.$$



Obrázek 3: Nákres difrakcie na mriežke.

Jedným zo znakov difrakcie na mriežke je práve fakt, že v danom smere konštruktívne interferujú lúče s daným  $m\lambda$ . Ak má použitý zdroj spektrum s veľkým rozsahom vlnových dĺžok, pre nasledujúce rády  $m$ ,  $m + 1$  dochádza k prekrytiu spektier

$$m(\lambda + \Delta\lambda) = (m + 1)\lambda \quad \Rightarrow \quad \Delta\lambda = \frac{\lambda}{m}.$$

Napríklad v treťom ráde sa vlnová dĺžka 400 nm prekrýva s vlnovou dĺžkou 600 nm v druhom ráde, 1 200 nm v prvom ráde a 300 nm v štvrtom ráde. Ak chceme v danom smere merať spektrum v okolí 600 nm, musíme použiť filter na ostatné vlnové dĺžky.

Disperziu mriežky odvodíme z mriežkovej rovnice jednoduchou diferenciáciou, vľavo podľa  $\lambda$  a vpravo podľa  $\beta$  ako

$$m d\lambda = -d \cos \beta d\beta \quad \Rightarrow \quad \frac{d\beta}{d\lambda} = -\frac{m}{d \cos \beta},$$

Diferenčný podiel je teda priamo úmerný rádu spektra. Pre rozlíšenie mriežky opäť uvažujeme krajné lúče dopadajúce na mriežku, pričom osvetľujeme  $N$  štrbín, teda dĺžku  $Nd$  mriežky. Rozlíšiť znova vieme vlnové dĺžky, pre ktoré je dráhový rozdiel rovný vlnovej dĺžke

$$\lambda = \Delta s = Nd \frac{d \sin \beta}{d\beta} \frac{d\beta}{d\lambda} \Delta\lambda = Nd \cos \beta \frac{m}{d \cos \beta} \Delta\lambda,$$

kde sme dosadili zo vzťahu pre disperziu. Preusporiadaním dostaneme vzťah pre rozlíšenie

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm.$$

Mriežky majú rozlíšenia od nízkych tisícok až do 100 000, teda výrazne vyššie ako hranol. Nevýhodou ale je, že v dôsledku prekrytia rádov môžeme naraz pozorovať len menšiu časť spektra.

### Iné konfigurácie

V niektorých prípadoch je výhodná iná konfigurácia systému. Echelle spektrograf (ešeletový, z francúzskeho slova pre schody) využíva fakt, že disperzia mriežky závisí od uhla dopadu. Použitím špeciálne pripravenej mriežky s uhlom dopadu a odrazu až do  $80^\circ$  je možné dosiahnuť rovnaké rozlíšenie aj pri menšom počte vrypov na milimeter. Pozeráme sa preto do oblasti s vysokými rádmi spektra  $m$ . Zatiaľ čo pre štandardný mriežkový spektrograf používame filtre na odstránenie nežiaduceho prekrytia spektrálnych rádov, v prípade ešeletového spektrografu tento jav plne využívame. Zaradením druhého disperzného prvku s disperziou v kolmom smere a s nízkym rozlíšením od seba jednotlivé rády oddelíme.

V tzv. „white pupil“ konfigurácii (ako v seriálovej úlohe) je najprv vytvorené spektrum s vysokým rozlíšením, pričom v mieste, kde sa nachádza jeho obraz (a obvykle tam býva detektor) je umiestnené zrkadlo odrážajúce svetlo do „druhého“ spektrografu s nízkym rozlíšením. Pre každý bod spektra s vysokým rozlíšením tak vznikne spektrum s nízkym rozlíšením obsahujúce sériu bodov s vlnovými dĺžkami zodpovedajúcimi rôznym rádum. Namiesto jednej stopy tak na detektore uvidíme sériu niekoľkých rovnobežných stôp zodpovedajúcich rôznym hodnotám  $m$ , a teda obsahujúcich rozdielne intervaly vlnových dĺžok. Takýto prístroj vďaka tomu v jednej snímke dokáže zachytiť vo vysokom rozlíšení (aj okolo 100 000) veľký rozsah vlnových dĺžok, často celé viditeľné spektrum.

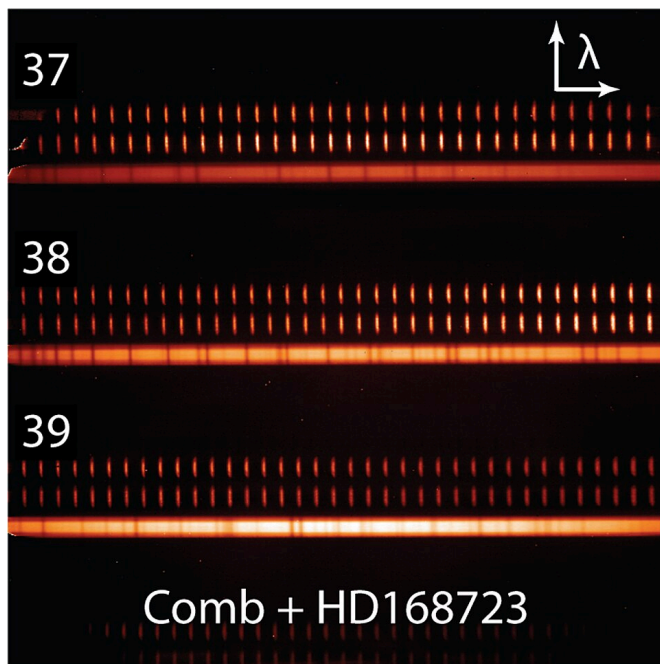
Iným špeciálnym usporiadaním pre pozorovanie v nízkom rozlíšení je princíp „slit-less/field spectrography“, keď náš prístroj neobsahuje štrbinu a na disperzný element tak dopadá svetlo z celého zorného poľa. Historicky sa používal optický hranol pred objektívom ďalekohľadu, dnes je častejšie použitie mriežky pred detektorom v mieste, kde sa bežne umiestňujú fotometrické filtre. Touto metódou je možné získať spektrum veľkého množstva objektov súčasne v jednej expozícii, avšak za cenu možného prekrytia spektier patriacich rôznym objektom.

### Spracovanie a kalibrácia

Väčšina spektrogrfov používa ako detektor CCD alebo CMOS čip chladený na nízku teplotu tekutým dusíkom. Získanú snímku takejto kamery potrebujeme previesť na závislosť intenzity od vlnovej dĺžky. Za týmto účelom potrebujeme okrem snímky pozorovaného objektu aj ďalšie tzv. kalibračné snímky:

<sup>5</sup>Dostupné z [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Starlight\\_\(6815972618\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Starlight_(6815972618).jpg).

<sup>6</sup>Dostupné z <https://esahubble.org/images/heic1412c/>. Zdrojom je NASA&ESA/Hubble.

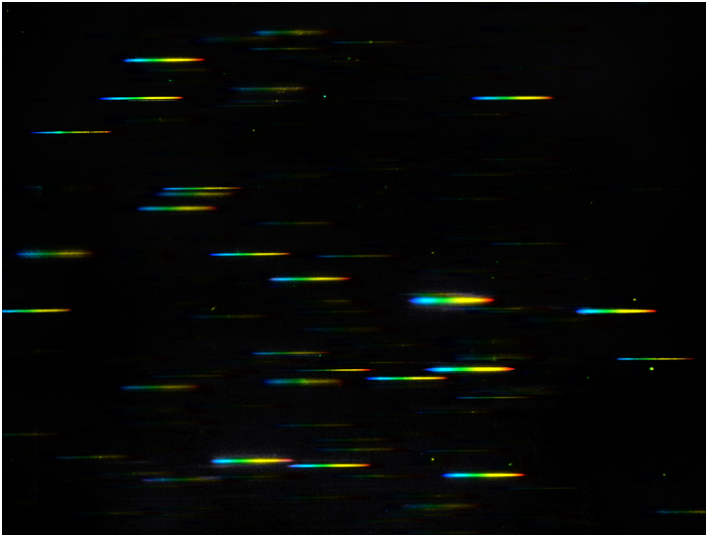


Obrázek 4: Výrez echelle spektra. Pre každý rád disperzie vidíme tri stopy: jednu pre hviezdu (spodná z trojice) s tmavými absorpčnými čiarami a dve z kalibračného zdroja (laserového hrebeňa) s úzkymi emisiami so známymi vlnovými dĺžkami. Vlnová dĺžka v rámci rádu rastie zľava doprava, naprieč rádmí zdola nahor. Pôvodná čiernobiela snímka bola ofarbená podľa nameranej intenzity; od bielej (najviac signálu) cez oranžovú a červenú až po čiernu farbu (žiaden signál).<sup>5</sup>

- *Zero* – snímka získaná pri nulovej expozičnej dobe kamery popisujúca nulovú hladinu kamery a šum snímacej elektroniky.
- *Dark* – snímka pri expozičnej dobe zodpovedajúcej vedeckej snímke pri zatvorenej závierke kamery, teraz bez akéhokoľvek dopadajúceho svetla. Táto snímka slúži na odstránenie tepelného šumu (signálu spôsobeného tepelným pohybom atómov v kamere), pre moderné kamery chladené tekutým dusíkom je však zanedbateľný a často sa preto nepoužíva.
- *Flat* – snímka získaná pri osvetlení spektrografa zdrojom svetla s čo najhladším spektrom bez spektrálnych čiar, ako napríklad žiarovkou.
- *Comp* – snímka referenčného zdroja, pre ktorý sú vlnové dĺžky spektrálnych čiar známe. Obvykle sa používajú katódové lampy plnené vzácnym plynom a dutou katódou z chemicky čistého kovu s veľkým množstvom spektrálnych čiar, napr. tórium-argónová a urán-neónová výbojka.<sup>7</sup>

Prvým krokom je využitím snímok *zero* a *dark* opraviť nulový bod jednotlivých pixelov

<sup>7</sup>Pre presnejšiu kalibráciu je možné použiť Fabryho–Pérotov etalón či laserový hrebeň. Ide o technicky náročnejšie zariadenia, ktoré ale poskytujú rovnomerné pokrytie s čiarami rovnakej intenzity.



Obrázek 5: Hubble použitím tzv. grism vie získať naraz spektrá v celom zornom poli. Pôvodná čiernobiela snímka bola umelo ofarbená podľa príslušných vlnových dĺžok svetla.<sup>6</sup>

vedeckej snímky, *flat* snímky a *comp* snímky. Následne sa na nich identifikuje priebeh spektra (*order tracing*) a v stĺpčekoch kolmo na spektrum sa sčíta hodnota pixelov. Výsledkom je priebeh akejsi intenzity na pozícii na čípe v smere pozdĺž spektra (v pixeloch). Vydelením priebehu na vedeckom spektre priebehom *flat* spektra odstránime drobné rozdiely lineariry medzi pixelmi a priebeh intenzity spôsobený optikou (tzv. blazovú funkciu). Tvar výsledného spektra teda závisí od použitej *flat* lampy – zvykom je preto spektrum ďalej normalizovať, teda identifikovať polohu kontinua a jeho priebehom spektrum vydeliť. Výsledné spektrum má tým pádom mimo čiar hodnotu 1.<sup>8</sup>

Stále však máme spektrum ako intenzitu v závislosti od polohy. Na prevod polohy do vlnových dĺžok použijeme spektrum získané z *comp* snímky. V nej identifikujeme polohu spektrálnych čiar so známou vlnovou dĺžkou najčastejšie gaussovským fitom. Cez získané dvojice  $(x, \lambda)$  následne fitujeme disperznú reláciu, ktorú využijeme na prevod polôh na vlnové dĺžky pre každý pixel získaného vedeckého spektra. Výsledné spektrum je teda súbor intenzít a vlnových dĺžok zodpovedajúcich pixelom na detektore.

### A na čo nám tie spektrá sú?

Spektroskopia nám umožňuje určiť, z čoho sú pozorované telesá zložené a ako sa pohybujú.

<sup>8</sup>V niektorých prípadoch je možné vykonať absolútnu kalibráciu do fyzikálnych jednotiek využitím zdroja žiarenia so známym priebehom, alebo ak poznáme spektrálnu citlivosť nášho prístroja. Druhý prípad platí pre väčšinu družicových prístrojov, ako napr. Hubblov, alebo Webbov ďalekohľad. Nimi získané pozorovania vhodných hviezd sa následne dajú použiť na kalibráciu niektorých prístrojov na zemskom povrchu.

*Pohyby telies*

Pre pohybujúci sa zdroj máme z Dopplerovho javu zmenu vlnovej dĺžky

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c},$$

kde  $v$  je radiálna zložka rýchlosti.<sup>9</sup> Poloha spektrálnych čiar sa preto posunie a tento posun vieme merať; či už na jednotlivých čiarach, alebo globálne na celom spektre. Okrem globálneho pohybu objektu je možné merať aj jeho interné rýchlosti (ako napríklad rotačnú rýchlosť hviezd či galaxií) z rozšírenia a tvaru spektrálnych čiar. V prípade pozorovaní hviezd je prvým krokom zvyčajne vytvorenie globálneho profilu reprezentujúceho „priemernú“ spektrálnu čiaru využitím zoznamu prítomných/očakávaných čiar a ich hĺbok/váh. Častou metódou je použitie kroskorelácie pozorovaného spektra a masky – výsledná funkcia/profil dosahuje maxima, ak je zhoda medzi maskou a pozorovaním najlepšia. Názornejšia je ale metóda dekonvolúcie (LSD, least-square deconvolution). Pozorované spektrum sa dá reprezentovať ako konvolúcia spektra s tenkými čiarami (danými fyzikálnym stavom pozorovanej látky s nulovou radiálnou rýchlosťou) a profilu rýchlostí pozorovaného materiálu. Dekonvolúcia nám umožňuje práve tento profil získať. Z jeho šírky vieme určiť rotačnú rýchlosť hviezd a z polohy jeho stredy rýchlostí hviezd voči pozorovateľovi.

Dôležité je uvedomiť si, že prístroj sa v priestore pohybuje, a teda nie je inerciálny. Pozorujeme totiž z povrchu rotujúcej planéty obiehajúcej okolo Slnka. Namerané rýchlosti treba korigovať o pohyb observatória voči ťažisku Slnčnej sústavy – barycentrickú korekciu, ktorá dosahuje až  $30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Obežné rýchlosti dvojhviezd majú pritom rádovo podobné hodnoty. V prípade exoplanét, kde pozorujeme pohyb hviezd spôsobený gravitáciou planéty, dokonca ide o hodnoty  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pre horúce Jupitery<sup>10</sup> až po jednotky  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  pre planéty hmotnosti Zeme na ročnej orbite. V tomto prípade je nutné pre výpočet barycentrickej korekcie zahrnúť aj Mesiac a planéty. Zaujímavé je, že rozlíšenie  $100\,000$  zodpovedá rýchlosti  $3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Meranie radiálnej rýchlosti s presnosťou na 3 až 4 rády je možné práve využitím veľkého množstva ( $10^3$  až  $10^4$ ) spektrálnych čiar.

*Stav látky a jej zloženie*

Spektrum hviezd je dané interakciou žiarenia prichádzajúceho zvnútra hviezd a látkou, ktorá hviezdou tvorí. V spektre tak vidíme spektrálne čiary atómov a molekúl, ktoré tvoria hviezd. Presný popis je zložitý a vyžaduje znalosť elektrónovej štruktúry látok danej kvantovej fyzikou (energie a pravdepodobnosti prechodov medzi energetickými hladinami), štatistikou fyzikou (popisujúcou obsadenie jednotlivých hladín) a teóriou prenosu žiarenia. Popíšme si preto pozorované spektrum hviezd kvalitatívne. V praxi sa pre určenie parametrov používa porovnanie pozorovaného spektra s teoreticky vypočítaným.

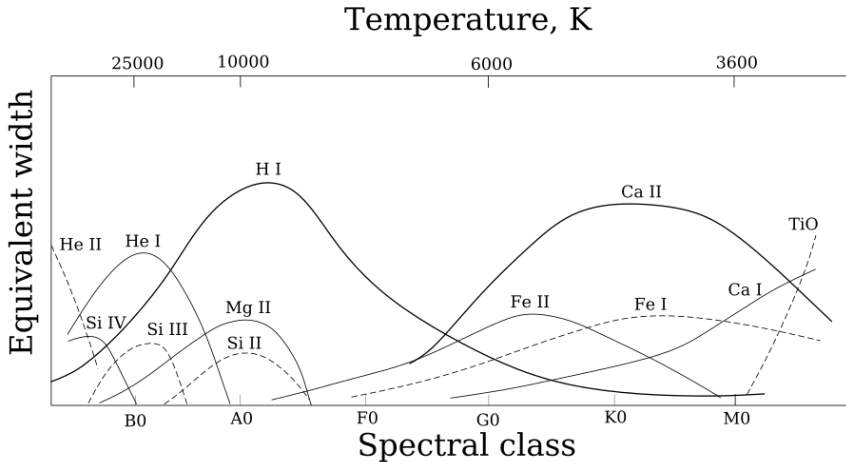
Prítomnosť spektrálnych čiar závisí jednak od ich vlastnej sily, ale aj od množstva častíc, ktoré na danej vlnovej dĺžke vyžarujú. So zvyšujúcou sa teplotou sa zvyšuje energia hladín, ktoré sú v látke obsadené. Pre najchladnejšie hviezd s teplotami pod  $3\,000 \text{ K}$  v spektrách dominujú pásy oxidov titánu a vanádu. Pri vyšších teplotách dochádza k disociácii týchto molekúl a v spektrách prevládajú čiary kovov ako horčík, sodík či železo. Hviezdy podobné Slnku s teplotami okolo  $5\,000 \text{ K}$  tak na prvý pohľad vyzerajú ako gule kovu. Pri vyšších teplotách sa v spektrách

<sup>9</sup>Neuvažujeme relativistické rýchlosti, pre ne je vzťah komplikovanejší.

<sup>10</sup>Tj. planéty hmotnosti Jupitera s obežnými dobami niekoľkých dní

začnú objavovať čiary ionizovaných kovov (maximálnu intenzitu majú okolo 6000 K) a čiary vodíka (maximálna intenzita okolo 9000 K).

Pre teploty v rozsahu približne od 20 000 K do 30 000 K sú dominantné čiary neutrálneho hélia, ktoré má najvyššiu ionizačnú energiu spomedzi neutrálnych atómov; a čiary vodíka postupne miznú, keďže vodík je ionizovaný na dvojicu protón a elektrón, ktoré nemajú čiarové spektrá. Ostatné chemické prvky je možné nájsť v stavoch s vysokým stupňom ionizácie. Pre najhorúcejšie hviezdy s teplotami nad 40 000 K je ionizované aj hélium. Porovnaním hĺbok čiar rôzne ionizovaných/excitovaných prvkov s teoretickými hodnotami je potom možné určiť teplotu hviezdy a zastúpenie jednotlivých chemických prvkov. Spektrálne čiary sú okrem rotácie rozširované aj tepelným pohybom a vzájomnými zrážkami. Z tvaru spektrálnych čiar vodíka<sup>11</sup> je preto možné určiť gravitačné zrýchlenie na povrchu, ktoré prostredníctvom tlaku určuje frekvenciu zrážok. Rozšírenie môže spôsobovať aj magnetické pole, pre silné polia dochádza dokonca k štípeniu čiar Zeemanovým javom. Pre určenie magnetických polí sa používajú spektrá získané v polarizovanom svetle, kde je pozorovaný signál priamo úmerný magnetickému poľu.



Obrázek 6: Vývoj sily (ekvivalentnej šírky = Equivalent width) spektrálnych čiar v spektre hviezdy v závislosti od ich efektívnej teploty (Temperature).<sup>12</sup>

## Záver

Tento diel bol venovaný z väčšej časti optickým princípom prístrojov, ktoré sa v astronómii používajú. V seriálovej úlohe budete mať možnosť vyskúšať si (hrubý) návrh echelle spektrografu. Moderná astronómia je založená práve na opto-mechanicky kvalitných prístrojoch; dúfam preto, že tento diel priniesol pokročilejšiu ukážku využitia učiva z optiky.

<sup>11</sup> Ako najľahší prvok je zrážkami najviac ovplyvnený.

<sup>12</sup> Dostupné z [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectral\\_lines\\_in\\_spectral\\_classes.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectral_lines_in_spectral_classes.svg).

*Pár slov k letošnímu ročníku seriálu*

V průběhu celého ročníku jste měli možnost nahlédnout do úžasného světa experimentální fyziky. Poodhalili jsme, jak měřit věci nesmírně malé i nesmírně vzdálené, a jak vůbec zjistit, z čeho se svět kolem nás skládá a jak v něm objekty interagují. V úlohách jste si vyzkoušeli, jaké to je interpretovat naměřená data z reálných experimentů, a zjistili, co všechno se v nich skrývá za informace.

Krásou experimentální fyziky není ale jen to, že můžete naměřit něco, čeho si nikdo před vámi nikdy nevyšiml. Můžete se dostat k nejmodernějším přístrojům a technologiím, které využívají pracně objevených fyzikálních principů a pracují na samém okraji toho, co lidstvo dokáže postavit. S tím se samozřejmě mohou pojit různé poruchy a následné opravy přístrojů nebo nějaká jejich domácí vylepšování; z technického a inženýrského hlediska je to však bezpochyby úžasná práce, před kterou je potřeba smeknout pomyslný klobouk.

Samozřejmě nebylo možné na několika stranách vysvětlit všechny aspekty daných experimentů a už vůbec ne jít do hloubky probraných technik. Vy jako řešitelé jste dokonce mohli být v množství nových pojmů lehce ztraceni. Cílem těchto textů ovšem nebylo naučit vás konkrétní techniky ani správně zpracovávat data, ale spíše jsme vám chtěli ukázat hranice, co všechno se dá o světě kolem nás zjistit, a rozšířit obzory, jak se získávají nové poznatky. Velkým zadosťučiněním by pro nás pak bylo, kdyby vám náš seriál někdy pomohl ocitnout se ve spojení s experimentální fyzikou nebo dokonce kdyby vám naše ukázka některých fyzikálních odvětví pomohla ve vašem budoucím výběru. Doufáme každopádně, že ať už vás vaše životní cesta zavede kamkoli, budete už mít tušení, jak fyzici poznávají svět.

*Jozef Lipták*  
liptak.j@fykos.cz

---

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/>.