



Výfučtení: Spektroskopie

Úvod

Toto Výfučtení se zabývá spektroskopií, což je vědní obor umožňující zkoumání hmotných těles pomocí rozkladu světla. Spektroskopie hraje naprosto zásadní roli ve fyzice i chemii. Pomocí tohoto oboru bylo již v devatenáctém století možno zkoumat chemické složení hvězd, díky čemuž jsme již tehdy byli schopni s jistotou ztotožnit hvězdy a Slunce. Na začátku dvacátého století umožnilo pozorování tzv. spektrálních čar vodíku pochopit podstatu atomu. Spektroskopickými metodami bylo taktéž objeveno rozpínání vesmíru a velká řada exoplanet.

Historický úvod

Dlouho nebylo lidem zřejmé, jaký je vztah mezi barvou a světlem. Po určitou dobu existovala domněnka, že barvy vznikají mísením světla a tmy. Isaac Newton tuto domněnku vyvrátil jednoduchým pozorováním: díváme-li se z dálky na černý text na stránce bílého papíru, bude se nám stránka jevit jako šedá, a nikoliv barevná.

Newton udělal řadu pozorování pomocí skleněného hranolu. Jako první si povšiml, že nechá-li hranolem projít sluneční světlo přicházející několik centimetrů velkým kruhovým otvorem do tmavé místnosti, vzniklý bílý kruh je na jednom konci modrý a na druhém červený.

Zmenšováním kruhového otvoru na úzkou příčnou štěrbinu se Newtonovi povedlo rozložit světlo na posloupnost barev nápadně připomínající duhu, kterou můžeme vidět na obloze. Této posloupnosti barev se říká *spektrum*. Nebylo zřejmé, zda hranol světlo pouze nějakým způsobem nezabarvuje. Newton ovšem zjistil, že za pomoci druhého hranolu lze složit spektrum zpět v bílé světlo. O Newtonovi si můžete přečíst více ve Výfučtení 1. série 8. ročníku¹ (nicméně tam se dočtete spíše o jiných věcech, které zkoumal).

Dále pak William Herschel, objevitel Uranu a jeho měsíců, rozkládal sluneční světlo hranolem na spektrum a přikládal teploměr pod jednotlivé barvy světla. Tímto chtěl přesněji popsat skutečnost, že se prostředek spektra jevil jasnější než okraje. Povšiml si ale, že nejvyšší teplotu naměřil až za okrajem viditelné části, na červené straně spektra. Usoudil tedy, že musí existovat paprsky, které jsou neviditelné, a přesto skutečné, které zahřívají tělesa více než paprsky viditelného světla. Ty dnes nazýváme **paprsky infračerveného záření**.

Pár let na to britský chemik William Wollaston rozkládal sluneční světlo pomocí hranolu a povšiml si, že ve spektru je šest úzkých černých čar. Nebylo zřejmé, jak je vysvětlit, považoval je za jakési přirozené dělení mezi sedmi barvami, které Isaac Newton označil za základní.

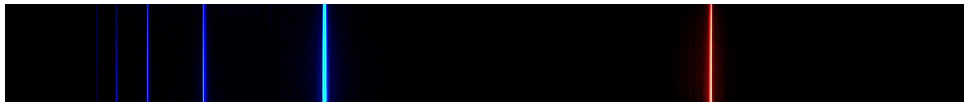
Později Joseph von Fraunhofer sestavil první mřížkový spektroskop, tedy zařízení, které využívá vlnových vlastností světla a rozkládá jej pomocí jemné **difrakční mřížky**. Fraunhofer se svým spektroskopem podíval na světlo plamene a povšiml si výrazné jasné čáry žlutooranžové barvy. Rozložíme-li světlo z plamene pomocí spektroskopu, nedostáváme spojitou duhu, ale od jedné barvy máme světla mnohem více. Poté se podíval na spektrum slunečního světla a našel *temnou* čáru na stejné vlnové délce. Tedy této barvy je ve spektru Slunce méně než jinde. Mřížkové spektroskopy mají mnohem větší rozlišení než hranolové a umožnily Fraunhoferovi objevit přes 500 takových *spektrálních čar*. Tyto nejvýraznější čáry ve slunečním spektru se nazývají Fraunhoferovy čáry.

¹https://vyfuk.mff.cuni.cz/_media/ulohy/r8/vyfučteni/vyfučteni_1.pdf

Gustav Kirchhoff, známý svými zákony o elektrických obvodech, a Robert Bunsen zkoumali spektra prvků zahřátých v plameni. Bylo třeba, aby samotný plamen svítil co nejméně, což zajišťovali zařízením, které se dnes nazývá Bunsenův kahan. Podařilo se jim dospět k významnému výsledku. Ztotožnili totiž jasné, tzv. **emisní čáry**, v plamenových spektrech s čarami temnými, které se nazývají **absorpční**. Tytéž chemické látky, za různých teplot a tlaků, způsobují ve spektru buď zjasnění nebo zeslabení dané čáry. Rozšířili tak Fraunhoferovo pozorování žlutooranžové čáry na obecný princip a uvědomili si souvislost spektra a příslušného chemického prvku.

Dalším ze série fyziků, kteří se věnovali problematice spekter, byl švýcarský fyzik Johann Jakob Balmer. Ten se zaměřil na nejjednodušší a ve vesmíru nejběžnější prvek – vodík.

Vyšel z pozorování vodíku, které pořídil Anders Jonas Ångström, po kterém je pojmenovaná jednotka odpovídající délce 10^{-10} metrů, tedy $0,1 \text{ nm} = 1 \text{ Å}$. Tato jednotka, která je ve spektroskopii často používaná, není součástí soustavy SI, ale je součástí širší rodiny metrických jednotek.



Obrázek 1: Viditelné spektrální čáry vodíku. Foto: Jan Homann, licence: CC-BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>)

Balmer sledoval Angstromova pozorování šesti spektrálních čar vodíku. Tyto čáry nejsou rozmístěny rovnoměrně, ale postupně se směrem ke kratším vlnovým délkám (tedy ve směru od červeného k fialovému světlu) zahušťují. Přestože ještě mechanismus vzniku čar nebyl znám, podařilo se Balmerovi nalézt vztah popisující jejich vlnovou délku:

$$\lambda = \lambda_B \frac{n^2}{n^2 - 4},$$

v němž n odpovídá číslu čáry při vhodném očíslování a $\lambda_B = 364,6 \text{ nm}$ je Balmerova konstanta. Není vůbec zřejmé, proč by něco takového mělo platit. Co dělá ve jmenovateli číslo čtyři? Jaký je význam Balmerovy konstanty?

Vzorec, který je odvozen přímo z pozorování přírody a není odvozen z jiných dříve známých vztahů, se označuje jako *empirický*, případně *fenomenologický*. Balmerův vzorec je skvělým příkladem takového vztahu a umožnil mu předpovědět ještě sedmou spektrální čáru, která je již za hranicí viditelné oblasti. Této posloupnosti se říká *Balmerova řada* a čáry v ní se značí jako H-alpha, H-beta, H-gamma a tak dál.

Existence takového vztahu byla velmi záhadná a po dlouhou dobu neměla žádné fyzikální odůvodnění. To ovšem změnil Niels Bohr, který za tuto práci obdržel Nobelovu cenu.

Bohr ukázal, že se elektrony v atomovém obalu vyskytují jenom na určitých energetických hladinách. Tím se velmi liší od předmětů, se kterými máme každodenní zkušenost. Například těžítko na stole může mít potenciální energii 50 J a po dopadu na zem bude mít energii 0 J . Během pádu se potenciální energie těžítko měnila naprosto plynule, bez žádných skoků.

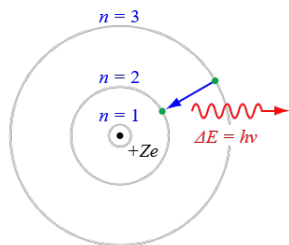
Naopak elektrony v atomovém obalu mohou mít pouze určité konkrétní množství energie, kterým se říká *kvanta*. Elektrony s vyšší energií osidlují energetické hladiny s vyšším hlavním

kvantovým číslem n a pokud chtějí sestoupit na hladinu s nižším číslem, musí vyzářit *foton* (neboli světelné kvantum).

Vlnovou délku takto vyzářených fotonů pak můžeme určit ze známého Planckova-Einsteino-va vztahu pro energii fotonu: $E = h \cdot f$, kde h je Planckova konstanta. O významu tohoto vztahu si můžete přečíst více ve Výfučení o Maxi Planckovi.² Když dosadíme za frekvenci $f = c/\lambda$, vidíme, že

$$E_n - E_m = \Delta E = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{\Delta E},$$

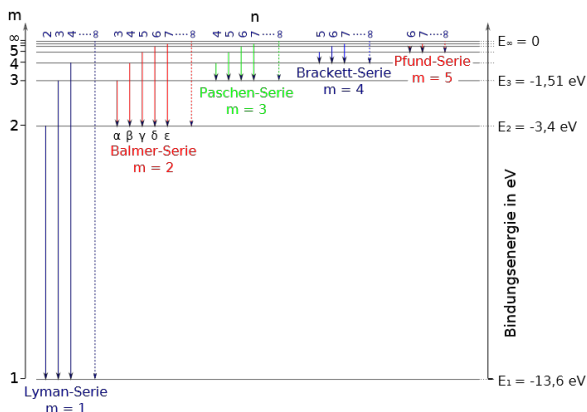
kde E_n je energie elektronu na původní vyšší hladině a E_m je energie na nižší hladině. Ze vzorečku vidíme, že čím bude větší rozdíl energií, tedy čím bude n větší, tím bude vlnová délka menší. Balmerovu vzoreci pak odpovídají právě ty přechody, kdy elektrony přechází do druhé energetické hladiny, tedy $m = 2$. Záhadná čtyřka ve jmenovateli Balmerova vztahu se ještě za použití jiných kvantověmechanických vztahů dá vysvětlit jako $4 = m^2 = 2^2$.



Obrázek 2: Bohrov model atomu. Elektron přechází ze stavu $n = 3$ do stavu $n = 2$, a tak se uvolní energie $\Delta E = E_2 - E_3$.

Foto: JabberWok, licence: CC BY-SA 3.0

(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)



Obrázek 3: Schéma přechodů v obalu vodíku. Na vertikální ose je vazebná energie elektronu v atomu (napravo ve eV). Vidíme, že může nabývat jen hodnot zanesených jako čáry, což odpovídá energetickým stavům elektronu E_n (nalevo jsou stavy očíslované).

Foto: Herbert Schletter, licence: CC BY-SA 4.0
(<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

Nyní se pokusíme porozumět významu Balmerovy konstanty. Hladiny odpovídající vysokým hlavním kvantovým číslem n jsou na sebe velmi nahuštěné, mají tedy velmi podobnou energii. Rozdíly ve vlnové délce přechodů jsou tedy také velmi malé. Tzv. *Balmerův skok* odpovídá vlnové délce fotonu vyzářeného při přechodu elektronu z hypotetické hladiny n jdoucí do ∞ na $n = m = 2$.

Co je ale tato hypotetická hladina? To je v zásadě úplná „hranice atomu“. Elektrony za touto hranicí již nejsou k atomu nijak vázány. To také znamená, že mohou mít libovolnou energii, podobně jako předměty se kterými máme běžnou zkušenost.

²https://vyfuk.mff.cuni.cz/_media/ulohy/r8/vyfucteni/vyfucteni_2.pdf

Využití

Vylíčili jsme si, jak se vyvíjely poznatky o spektroskopii, a objasnili základní pojmy. Jaké má ale vůbec toto všechno využití? A má vůbec nějaké? Aplikaci poznatků o spektrech najdeme v mnoha oborech.

Chemická analýza

Spektrum je pro daný chemický prvek trochu jako otisk prstu. Podle daných čar můžeme jednoznačně identifikovat daný prvek, nebo – jak tomu v historii několikrát bylo – objevit prvek zcela nový. Jedná se například o cesium, objevené Kirchhoffem a Bunsenem, které nese svůj název podle nebesky modré emisní čáry (nebe se latinsky řekne caelum). Podobně bylo objeveno rubidium, které se jmenuje podle své rubínově červené emisní čáry, nebo indium, jehož emisní čára má indigově modrou barvu.

Právě díky spektroskopii a tomu, že neexistují dvě chemicky odlišné látky, jejichž spektra by byla totožná, můžeme určovat složení různých věcí – od roztoků v laboratořích, přes hvězdy, až po atmosféry vzdálených exoplanet.

Když pak někde pozorujeme čáry, které nedokážeme přiřadit k žádnému známému prvku, je jasné, že jsme objevili prvek nový. Takto bylo objeveno třeba helium, když Pierre Janssen při zatmění Slunce roku 1868 pozoroval v jeho spektru neznámé žluté linie, které přiřadil novému prvku. Ten byl po bohu Slunce Heliovi pojmenován helium. Na zemi pak bylo helium izolováno až v roce 1895.

Obdobná situace nastala při pozorování spekter planetárních mlhovin, které mají výraznou zelenou emisní čáru. Ta nebyla ztotožněna s žádným známým prvkem, a tak se tato látka v mlhovinách označila jako nebulium. Až později bylo zjištěno, že se jedná o spektrální čáru ionizovaného kyslíku, která do té doby nebyla na Zemi pozorována.

Astronomie

Spektrum je pro nás velmi důležité i v jiných oblastech astronomie, zejména pro určování rychlostí. Jako pro každé jiné vlnění, i pro světlo totiž funguje Dopplerův jev, který způsobuje posuny vlnových délek při pohybu zdroje záření. Když tedy pozorujeme například ve hvězdě nějakou významnou čáru na vlnové délce λ a v laboratoři tu samou čáru máme na vlnové délce λ_0 , zjistíme, že

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c},$$

kde c je rychlost světla a v je rychlost zdroje vůči pozorovateli v radiálním směru – tedy ve směru buď k přímo k nám, nebo přímo od nás. Podle toho, kam se čáry posouvají rozlišujeme rudý (vzdalování zdroje) a modrý (přibližování) posuv.

Měřením Dopplerova jevu u dvojhvězd tak například dokážeme velmi přesně změřit radiální rychlosti jednotlivých složek a dopočítat tak další parametry. Nebo můžeme na základě posunů ve spektru odhalit neznámého průvodce hvězdy – další hvězdu, ale třeba i exoplanetu.

Marco Souza de Joode
marco@vyfuk.org

Lukáš Linhart
lukasl@vyfuk.org

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími 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/>.