

=====

10. kapitola o spektroskopii

praktická UKÁZKA jednoduchého spektrografu a porovnání s OBR spektráku v Ondřejově

zdroj světla, coelostat, objektiv, štěrbinu, odpohled, kolimátor, disperzní člen (mřížka/hranol), objektiv kamery, detektor/stínítko

Proč používám ve spektrografu štěrbinu?

-> Protože potřebuji 1-D strukturu, kterou disperzním členem ROZMETU do strany.

Kde jsou ohniskové roviny jednotlivých členů?

(pozn. o správně navazujících aperturách)

Kam zařazuji kolimátor?

-> Tak, aby na mřížku dopadaly paprsky ROVNOBĚŽNĚ, od ní se odrážely (rozmítaly) a pak se pomoci čočky kamery zobrazovaly v její ohniskové rovině.

Spektroskopie je vlastně "hardwarová Fourierova analýza". :)

OBR 3 typy spekter

spojité - pevná látka, kapalina a hustý plyn

emisní - řídký průhledný plyn

absorpční - poloprůhledný chladný řídký plyn nad spojitě zářícím hustým horkým plynem

pozn. o "obrácení" sodíkové čáry (Bunsen & Kirchhoff 1859)

UKÁZKA na spektrografu - absorpce ve skleněném kotoučku ("ve hvězdné atmosféře")

3 DRUHY INTERAKCE záření s látkou: absorpce, emise, stimulovaná emise

(pozn. o "nepravé" absorpci = rozptylu do strany)

6 DRUHŮ PŘECHODŮ v atomech:

zvýšení energie:

přechod	e-	název děje	popis
vázaně-vázaný (b-b)	zůstává v atomu	excitace	nep pružná srážka atomu s jinou částicí ABSORPCE fotonu, kvantovaná energie
vázaně-volný (b-f)	opustí atom	ionizace srážková fotoionizace	nep pružná srážka ABSORPCE fotonu, NEkvantovaná
volně-volný (f-f)	zůstává volný	spojitá opacita	ABSORPCE fotonu elektronem, v blízkosti iontu, přeměna na kinetickou, NEkvantovaná

snížení energie:

vázaně-vázaný (b-b)	zůstává v atomu deexcitace srážková zářivá	"superpružná" srážka atomu s jinou částicí EMISE fotonu, kvantovaná	
volně-vázaný (f-b)	zachycen iontem rekombinace 3-částicová srážka iontu, elektronu a další částice rekombinace zářivá	EMISE fotonu, nekvantovaná	
volně-volný (f-f)	zůstává volný brzdné záření (neboli bremsstrahlung)	EMISE fotonu, nekvantovaná	

OBR spektra Slunce a Arktura <- INSTRUKTIVNÍ PŘEBLIKÁVÁNÍ :)

Je zřetelně vidět rozdíl v kontinuích (Planckových funkcích) a hlavně odlišnosti v intenzitě spektrálních čar -> měli bychom pochopit proč!

Odkud pochází VĚTŠINA fotonů na Zemi? (viz Mikulášek)

- záchyt elektronu ZÁPORNÝM IONTEM H- v atmosféře Slunce je hlavním zdrojem KONTINUA, protože tento iont má největší opacitu ve fotosférách * pozdních typů;0 má malou energii ionizace (0.75 eV ~ 1640 nm)
- <- V i NIR fotony jej ionizují bez problémů!

poznámka o stimulované emisi a LASERu (nebo MASERu)

Light (Microwave) Amplification by Stimulated Emission of Radiation
-> spektrum úzkých čar; kosmické masery v obálkách obřích hvězd

poznámka o ZAKÁZANÝCH ČÁRÁCH - metastabilních hladinách

s životní dobou >> než obvyklých $\sim 10^{-9}$ s
-> v hustém prostředí dochází PŘED vyzářením fotonu ke srážkové deexcitaci
-> v extrémně řídkém prostředí může k těmto málo pravděpodobným přechodům dojít

poznámka o nerovnovážných procesech (vzdálených od TD rovnováhy)

-> samozřejmě NEMÍVAJÍ planckovské spektrum (mluvíme o netepelném záření)

např. BRZDNÉ ZÁŘENÍ (bremsstrahlung)

- cyklotronové (generuje se pohybem e- v magpoli při $v \ll c$)
- synchrotronové (když $v \sim c$, směrované, spojitě)

např. záření Slunce v UV a RTG oboru, kde je zároveň velká proměnnost (což jen potvrzuje TD nerovnováhu)

Proč vzniká ABSORPČNÍ spektrální ČÁRA?!

-> atom pohltí foton a potom se deexcituje "superpružnou" SRÁŽKOU = PRAVĚ absorpce (takže se foton efektivně "ztratí" a plyn se ohřeje)
~~~~~ ne že by existovala nějaká "levá", ale nepravá...

-> absorpce fotonu atomem s energií  $hf = hf_0$  a emise v náhodném směru (tj. rozptyl "do strany") = NEPRAVĚ absorpce; záření na  $f < f_0$  oslabeno není => je také SELEKTIVNÍ!

OBR mechanismu nepravé absorpce

Ale pozor, PŘÍMÝ ROZPTYL NA ELEKTRONECH (třeba i vázaných v atomech nebo volných,

ALE v blízkosti iontu), při kterém foton vůbec NENÍ pohlcen => je SPOJITÝ

|                    |   |                                                              |
|--------------------|---|--------------------------------------------------------------|
| Rayleighův rozptyl |   | <- zde se žádná vlnová délka nemění, pouze účinnost rozptylu |
|                    |   | závisí na vlnové délce (funguje např. v zemské atmosféře)    |
| Thomsonův rozptyl  |   | rostoucí energie fotonu                                      |
|                    |   |                                                              |
| Comptonův rozptyl  | V | <- zde se MĚNÍ vlnová délka rozptýleného fotonu!             |

pozn. o Mieho rozptylu na větších částicích (např. kapičkách oblaků),  
<- nemění lambda ani účinnost není příliš závislá na lambda

Podobně PRAVÁ absorpce fotonu při IONIZACI atomů (uvolnění e-)  
(probíhá nejpravděpodobněji za hranami spektrálních sérií)  
je SPOJITÁ => absorpční kontinuum (např. Balmerovo kontinuum).

OBR náčrtek kvantovaných hladin energie v atomu a spojitých v ionizovaném stavu

poznámka: Energetické hladiny se k sobě přibližují, ale "velikost" atomu (vlnová fce pro e-)  
s energií ROSTE - blízko ionizace je už atom MAKROSKOPICKY VELKÝ! :)

Proč vznikají spektrální série?

-----  
atom vodíku: kvantování energie, hlavní kvantové číslo n

$$E_n = -13.6 \text{ eV} / n^2$$

OBR hladiny energie v H

zářivé přechody mezi hladinami n<sub>1</sub> a n<sub>2</sub> (Rydberg 1888) =>

$$1/\lambda_{\text{ve vakuu}} = R_{\text{pro vodík}} * Z^2 * (1/n_1^2 - 1/n_2^2)$$

| n1  | n2 | -> | nekonečno | série   | hrana  |                                  |
|-----|----|----|-----------|---------|--------|----------------------------------|
| 1   | 2  |    |           | Lyman   | 91 nm  |                                  |
| 2   | 3  |    |           | Balmer  | 365 nm | <- tato je ve viditelném oboru * |
| 3   | 4  |    |           | Paschen | 821 nm |                                  |
| ... |    |    |           |         |        |                                  |

$$h*c*R = 13.6 \text{ eV} \Rightarrow R = 1.097e7 \text{ m}^{-1}$$

\* např. H<sub>alpha</sub> (tj. přechod mezi hladinami 2->3) má vlnovou délku:

$$1/\lambda = 1.1e7 * 1 * (1/4 - 1/9) = 1.5e6 \Rightarrow \lambda_{\text{H}_\alpha} = 656.3 \text{ nm}$$

Existují i DALŠÍ hladiny energie, např. hyperjemné rozštěpení  
(odpovídající přechodu mezi paralelními a antiparalelními spiny elektronu a jádra;  
týká se i základního stavu) => rádiová čára 21 cm  
předpovězená van de Hulstem (1944) a pozorovaná Ewenem & Purcellem (1951)

Myšlenkový experiment s oblakem postupně zahříváného a zhušťovaného plynu

(viz Mikulášek)

začneme s oblakem vodíku " $\rho = 0$  a  $T = 0$ " (při troše nadsázky):

1. zvyšujeme  $T$ :

nejdříve nezáří (energie srážek nestačí ani na excitaci do 2. hladiny)

|  
V

pak excitace a zároveň nějaké ionizace,  
zářivé deexcitace a rekombinace

=> emise v čarách, za hranami sérií malá kontinua

rekombinace  $H^-$  => slabé kontinuum

|  
V

při  $\sim 1/2$  atomů ionizovaných dosahují intenzity čar maxima

|  
V

úplná ionizace, zmizí  $H^-$

=> záření v čarách i v kontinuu slábne

2. zvyšujeme  $\rho$  (anebo ekvivalentně  $V$ ) při  $T > 0$ :

pouze roste intenzita záření (je tam více atomů)

|  
V

absorpce, rozptyl

-> atomy nejvíce pohlcují fotony PRÁVĚ V ČARÁCH  
a po SRÁŽKOVĚ DEEXCITACI už nemusí být vyzářeny!

=> růst emisních čar se zastaví

|  
V

kontinuum roste až se "srovná" s emisními čarami a čáry "zmizí" => AČR  
kdyby měl plyn chladnější obálku => absorpční čáry

Historie spektroskopie:

-----  
(dle Mikuláška)

Jan Marek Marci (1595-1667) - lanškrounský rodák, viz pamětní desku v Melantrichově ulici u Staromáku

Newton (1666) - rozklad a opětovné složení světla hranolem

Wollaston (1802) - nahradil díрку štěrbinou, viděl temné čáry ("hranice přirozených barev")

Fraunhofer (1814) - objev tisíců čar ve spektru Slunce; později i čáry Siria, Castora

Brewster (1832) - tellurické čáry vznikající v atmosféře Země  
(zesilují se s klesáním objektu k obzoru)

Bunsen & Kirchhoff (1859) - vysvětlili obrácení sodíkové čáry  
<- plyn chladnější než fotosféra se vždy projeví absorpcí!  
(a to přesto, že ho předtím Bunsen viděl v kahanu, jak emituje)

Lockyer, Janssen (1868) - objev nového prvku hélia ve spektru Slunce

Lockyer, Frankland (1869) - spektrum závisí nejen na chemickém složení, ale i na rho a T

Lockyer (1873) - teorie štěpení molekul -> atomy -> protoatomy (neznal ionizaci)

Planck (1901) - záření AČR:

$$\rho(\omega, T) = \frac{h \omega^3}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{1}{\exp(h \omega / k T) - 1}$$

Saha (1920) - závislost stupně ionizace X na teplotě T, koncentraci n a ionizační energii I:

$$X^2 / (1-X) = 1/n \cdot h^3 \cdot (2 \pi m_e k T)^{3/2} \cdot \exp(-I/kT)$$

Spektrální klasifikace hvězd:

-----  
harvardská: OBAFGKMLT

OBR hvězdná spektra

OBR spektrum hnědého trpaslíka typu T

O: přítomny čáry HeII, HeI, HI, OIII, CIII, NIII  
B: dominují HeI, HI, přítomny OII, CII, NII, FeIII, MgII  
A: chybí HeI, dominují HI, přítomny OII, CII, NII, FeIII, MgII  
F: slabší dominantní HI, čáry kovů  
G: dominují CaII, objevují se první molekulární pásy  
K: bohaté na neutrální kovy  
M: převládají molekulární pásy TiO, VO  
L: čáry KI, RbI, CsI, CrH  
T: pásy CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O

luminozitní třídy = Morganova-Keenenova klasifikace:

<- lze poznávat nejen podle celkové jasnosti (tzn. měření vzdálenosti),  
ale také dle TLAKOVÉHO rozšíření spektrálních čar OBR  
(trpaslíci mají na povrchu větší g (p) než obři)

Ia nadobři  
Ib jasní obři  
II obři  
III podobři

- IV nadtrpaslíci
- V \* hlavní posloupnosti (trpaslíci)
- VI podtrpaslíci
- VII bílí trpaslíci

Jaké jevy se podílejí na ROZŠÍŘENÍ spektrálních čar?

-----  
 (Jinými slovy: jaké RŮZNĚ energie může atom vyzařovat NEBO pohlcovat?)

profil čáry: jádro, křídlo, pološířka

lokální jevy:

- PŘIROZENÁ ŠÍŘKA dle principu neurčitosti (Heisenberg, 1927):  
 $\langle \Delta v \rangle * \langle \Delta x \rangle = h \Leftrightarrow \langle \Delta E \rangle * \langle \tau \rangle = h$   
 platí jen pro EXCITOVANÉ stavy (v základním stavu může být  $\tau = \infty$ )  
 => lorentzovský profil
- TLAKOVĚ ROZŠÍŘENÍ (šířka u obrů << trpaslíků kvůli povrchové gravitaci)  
 vzájemné elmag působení částic při srážkách/přiblíženích,  
 nebo působení celého pole okolních atomů (jež posouvá energetické  
 hladiny atomu), příp. van der Waalsových sil  
 => lorentzovsky profil

pozn. o atmosférách hvězd a barometrické formuli:

gravitační zrychlení na povrchu trpaslíka a obra:

$$g_{\text{trpaslíka}} = G M/R^2 \approx 6.7e-11 * 0.1*2e30 / (0.1*7e8)^2 \text{ m/s}^2 \approx 2700 \text{ m/s}^2$$

$$g_{\text{obra}} \approx 6.7e-11 * 10*2e30 / (1000*7e8)^2 \approx 2.7e-3 \text{ m/s}^2$$

Jaký je vertikální hustotní profil izotermální atmosféry (při tomto g)?

$$"F = m * a"$$

$$\text{hydrostatická rovnováha: } dp/dS = - \rho * dS * dz * g \Rightarrow dp = -\rho * g * dz$$

$$\text{stavová rce ideálního plynu: } p * V/T = N * k_b = \underbrace{n_{\text{mol}} * R_m}_{\text{počet molů}} \Rightarrow p = R_m/M_{\text{mol}} * \rho * T$$

počet částic      počet molů

$$\rho = p * M_{\text{mol}} / (R_m * T)$$

$$dp/dz = -g * M_{\text{mol}} / (R_m * T) * \rho \quad \text{nebo} \quad dp/p = -g * M_{\text{mol}} / (R_m * T) * dz$$

$$p = p_0 * \exp(-g * M_{\text{mol}} / (R_m * T) * z) \quad \ln p - \ln p_0 = -g * M_{\text{mol}} / (R_m * T) * (z - z_0)$$

$$\rho = \rho_0 * \exp(-g * M_{\text{mol}} / (R_m * T) * z) \quad (<- \text{tataž exponenciela})$$

=> pro trpaslíka je atmosféra ŘÁDOVĚ hustší!

=> čím vyšší hustota, tím se samozřejmě atomy více navzájem elmag. ovlivňují,  
 jejich energetické hladiny posouvají a příslušné čáry rozšiřují

(Mimochodem, charakteristická VÝŠKA atmosféry (na které nezáleží šířka spektrální čáry,  
 ale její "hloubka") je:

$$z_{\text{trpaslíka}} = R_m * T / (g * M_{\text{mol}}) \quad <- \text{tam je } \rho = 1/e \rho_0$$

$$= 8.3 * 3e3 / (2.7e3 * 1.008e-3) \text{ m} \approx 1e4 \text{ m} = 10 \text{ km};$$

$z_{\text{obra}}$  je  $\sim 1e6$  krát větší, tj. 10 miliónů km.)

- DOPPLERŮV JEV (Doppler, 1842) = TERMÁLNÍ dopplerovské rozšíření

<- atom "vidí" foton dopplerovsky posunutý, takže i když v naší klidové soustavě jeho energie neodpovídá rozdílu hladin v atomu, tak vzhledem k atomu už ano a MŮŽE BÝT POHLCEN (při b-b přechodu)

Při termálním pohybu jsou rychlosti maxwellovské -> Dopplerův posun jimi způsobený vede na GAUSSOVSKÝ PROFIL absorpční čáry!

- STARKŮV JEV (Stark, 1913) - elektrické pole (globální, nebo přiblížení IONTŮ při srážkách a zvláště vysokém tlaku) OBR závislosti rozšíření na intenzitě pole
- ZEEMANŮV JEV (Zeeman, 1897) - magnetické pole OBR sluneční skvrny

"ROZLEHLÉ" (nelokální) jevy:

- rotace, orbitální pohyb, oscilace atmosféry, erupce plazmatu => Dopplerův posun
- OPACITA - atomy emitují v čarách, ale při vysokém rho (nebo velkém V) jsou opětovně absorbované JINÝMI atomy na TÝCHŽ čarách; rozšíření vzniká proto, že v křídlech je menší pravděpodobnost REabsorpce než v jádru čáry!

Gaussův profil (např. Dopplerovým posunem) + Lorentzův profil (působený tlakem) => Voigtův profil celkově (KONVOLUCE)

OBR tvary základních profilů v Gnuplotu

=> Gauss tvoří jádro a Lorentz křídla čáry!

-----  
EXOPLANETY <- příklad vyžití spekter (tedy dopplerovského posunu čar orbitálním pohybem \*)

OBR:

v roce 2006 známo 182 exoplanet;  
většina byla objevena dle radiálních rychlostí;  
příklady exoplanet (<http://exoplanets.org>);  
klasická 51 Peg b (Mayor & Queloz 1995);  
tranzitující HD209458 b;  
vícenásobný systém upsilon And b, c, d;  
s gravitační rezonancí 2:1 (Gliese 876 b a c o hmotnosti 7,5 M<sub>E</sub>; Rivera et al. 2005);  
závislost počtu planet na metalicitě mateřských \*;  
planeta PSR B1620-26cs nízkou metalicitou (Sigurdsson et al. 2003).

-----