

Spektroskopie Vegy

Jako malý kluk jsem celkem pravidelně sledoval jeden televizní pořad – jmenoval se Vega. Šlo o pásmo několika seriálů a rozhovorů s různými osobnostmi. Jaká byla moje radost, když jsem se dozvěděl, že v tomto praktiku se budeme věnovat právě spektru hvězdy, která dala tomu pořadu jméno. Srdce zaplavila vlna nostalgie a zbytek mozkových buněk ožil slabými elektrickými výboji matných vpomínek. To už je proklatě dávno.

Teď ale vážně, analýza spekter hvězd patří k velmi důležitým metodám výzkumu hvězd. I ze spektra pořízeného amatérskou nebo poloprofesionální výbavou, jako je právě naše spektrum Vegy, se dá zjistit o této hvězdě mnoho užitečných informací. V prvním přiblížení se dá říci, že hvězdy září jako absolutně černá tělesa, jejichž záření popisuje Planckův vyzařovací zákon:

$$B(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k_B\lambda T} - 1}, \quad (1)$$

kde $B(\lambda)$ označuje vyzařovanou intenzitu v závislosti na vlnové délce, jediným parametrem je termodynamická teplota tělesa T , k_B je Boltzmannova konstanta, h Planckova konstanta, c rychlost světla ve vakuu. Pokud tedy napozorovaným spektrem proložíme tuto závislost, jsme schopni odhadnout povrchovou (přesněji řečeno barevnou) teplotu hvězdy.

Ze Stefanova-Boltzmannova zákona víme, že celkový vyzařovaný výkon hvězdy je úměrný efektivní teplotě na čtvrtou (pro jednoduchost ji teď ztotožníme s tou barevnou):

$$L_* = 4\pi R_*^2 \sigma T^4, \quad (2)$$

R_* je poloměr hvězdy, σ potom Stefanova-Boltzmannova konstanta. Zářivý výkon můžeme určit měřením zářivého toku F_* a vzdálenosti hvězdy, tedy:

$$L_* = 4\pi d_*^2 F_*, \quad (3)$$

kde d_* je vzdálenost, kterou určíme ze znalosti paralaxy (pro Vegu $0,129''$). Světelný tok můžeme přibližně zjistit integrací intenzity vyzařované absolutně černým tělesem odpovídajícím hvězdě. Protože nás zajímá pouze záření ve viditelném oboru, zahrneme do výpočtu ještě propustnost V filtru. Údaje o propustnosti standardního V filtru nemám k dispozici, a tak jsem je nahradil údaji o propustnosti V filtru z observatoře na Kraví hoře ($V(\lambda)$). Je tedy:

$$F_* = \int_0^\infty B(\lambda) V(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Z rovnic (2), (3) a (4) můžeme na základě získaného spektra určit poloměr hvězdy R_* .

Ve spektru je mimo jiné možné si všimnout výrazných vodíkových absorpčních čar. Dalším úkolem tedy je zjistit jejich přesnou polohu ve spektru a porovnat ji s vypočtenou hodnotou. Protože je běžnější hovořit o vlnové délce čar, budu se tohoto údaje držet i v tomto protokolu. Polohu čar ve spektru určíme nalezením jejího těžiště, které vypočteme takto:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_i w_i \lambda_i}{\sum_i w_i}, \quad (5)$$

kde jsme označili w_i váhy vlnových délek λ_i v okolí minima intenzity čáry. Váhy vypočteme odečtením intenzity I_i jednotlivých vlnových délek ve spektru od kontinua:

$$w_i = B(\lambda_i) - I_i. \quad (6)$$

K vypočtení vlnové délky spektrálních čar vodíku této tzv. Balmerovy série slouží tento vztah:

$$\lambda_{H_i} = 1/R_A \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{i^2} \right)^{-1} \quad i = 3, 4, 5, \dots \quad (7)$$

R_A je označení Rydbergovy konstanty a spektrální čáry vodíku Balmerovy série se po řadě označují $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ atd.

Nápadnou skutečností, kterou zjistíme, když se podíváme na spektrum naší hvězdy, je to, že absorpční čáry jsou rozšířené. Pátrání po příčinách tohoto rozšíření nás dovede k dalším vlastnostem atmosféry hvězdy.

První možností je rozšíření čar v důsledku neuspořádaného pohybu částic absorbujících nebo emitujících záření. To je závislé na teplotě plynu T a hmotnosti částic m_H – v tomto případě jde hlavně o vodíkové atomy:

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0 e^{-(\lambda-\lambda_0)^2/\Delta\lambda_D^2}, \quad \Delta\lambda_D = \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{2k_B T}{m_H}}. \quad (8)$$

Volba konstanty Φ_0 zřejmě závisí na způsobu normování intenzity ve spektru, λ_0 označuje vlnovou délku středu čáry.

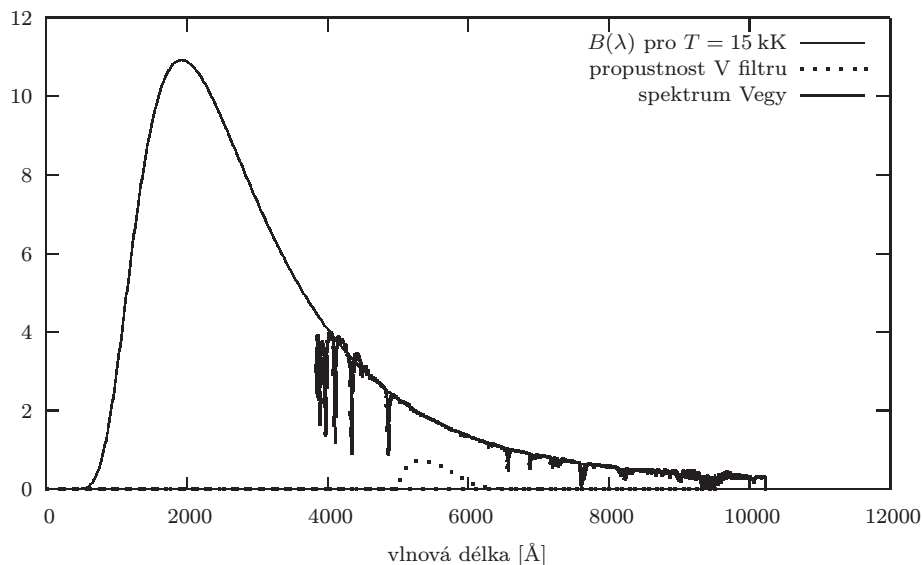
Druhou příčinou rozšíření spektrálních čar jsou vzájemné srážky částic. Rovnice srážkového profilu je následující:

$$\Phi_L(\lambda) = \frac{\Phi_0}{1 + (\lambda - \lambda_0)^2 / (\Delta\lambda_L / 4\pi)^2}, \quad \Delta\lambda_L = 2n_e \pi r_B^2 / \sqrt{\frac{m_H}{2k_B T}}. \quad (9)$$

V tomto vztahu vystupuje kromě již známých konstant a proměnných poloměr vodíkového atomu r_B , který pro jednoduchost položíme rovný Bohrovu poloměru a dále koncentrace částic n_e , kterou máme za úkol zjistit.

Výsledky

Nejprve tedy k určení barevné teploty, po určitém laborování s parametry $B(\lambda)$ – tedy teplotou a konstantou před celým výrazem jsem došel k hodnotě $T = 15$ kK (pro zajímavost multiplikativní konstanta vyšla $0,042 \cdot 10^{-29}$, což nebude v žádném případě náhoda, poskytuje to odpověď na mnohé otázky). V současnosti přijímaná efektivní teplota Vegy je nižší, $T = 9,5$ kK (různé zdroje se neliší o víc než 200 K).



OBRÁZEK 1

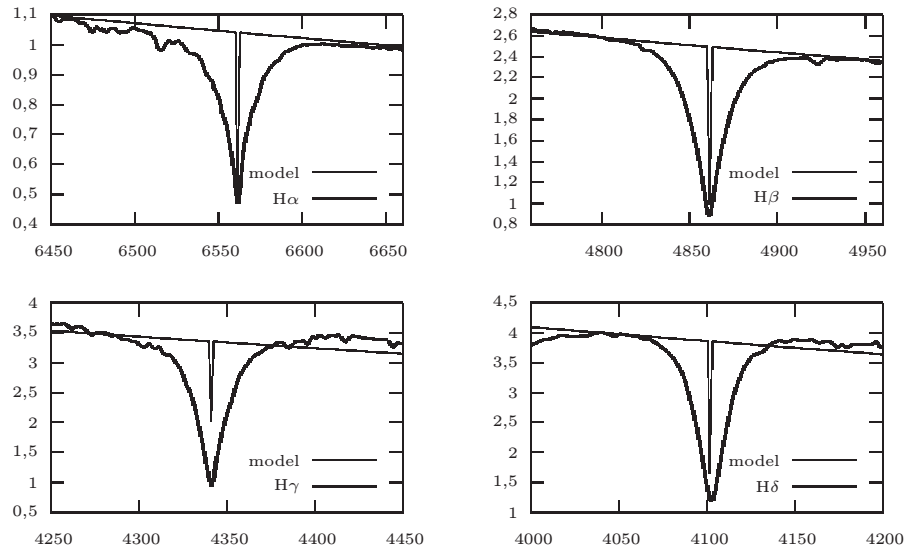
Na obrázku (1) je vykreslena závislost $B(\lambda)$ pro uvedenou teplotu spolu se spektrem Vegy a také propustností V filtru.

S údaji, které jsou uvedeny už v první části protokolu jsem nakonec došel k hodnotě poloměru Vegy přibližně $1,4 \cdot 10^9$ m, tedy $2,0 R_{\odot}$.

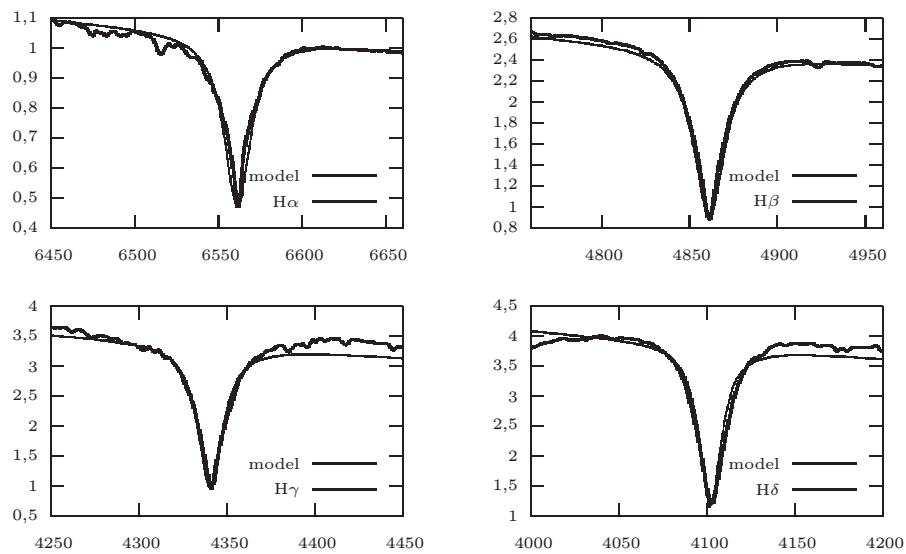
	H α	H β	H γ	H δ
vypočtená hodnota [Å]	6564,7	4862,7	4341,7	4102,9
změřená hodnota [Å]	6561,7	4861,7	4341,0	4102,3
chyba určení středu čáry [Å]	1,3	1,8	1,7	1,6
rozdíl změřené a vypočtené hodnoty [Å]	-3,0	-1,0	-0,8	-0,6

TABULKA 1 Srovnání vypočtené a změřené vlnové délky některých vodíkových čar ve spektru Vegy.

Výsledky dalšího úkolu, tedy určení přesných poloh absorpčních spektrálních čar vodíku a jejich porovnání s vypočtenými hodnotami shrnuje tabulka (1).



OBRÁZEK 2



OBRÁZEK 3

Poslední úkol je zaměřený na rozšíření spektrálních čar a určení koncentrace částic v atmosféře Vegy. Rozšíření tepelným pohybem částic ilustrují grafy na obrázku (2), které jasně ukazují, že tento mechanismus nebude na vysvětlení rozšíření čar ve spektru Vegy dostačovat.

Mnohem nadějněji se jeví druhá příčina rozšíření čar, tedy vzájemné srážky částic. To dokládají grafy na obrázku (3). Koncentrace částic pro jednotlivé vodíkové čáry jsou potom v tabulce (2).

	H α	H β	H γ	H δ
koncentrace částic [m $^{-3}$]	3 . 10 28	6 . 10 28	6 . 10 28	6 . 10 28

TABULKA 2 Koncentrace částic v atmosféře Vegy.

Pro odhad průměrné koncentrace částic v celém objemu hvězdy je možné použít větu o viriálu. Z jednoduchého výpočtu plyne, že je pro hvězdu jako je Vega rovna řádově 10 29 m $^{-3}$. Musíme si ale uvědomit, že v atmosféře hvězdy bude koncentrace částic menší. Možným vysvětlením poněkud zavádějících výsledků určených z rozšíření spektrálních čar srážkovým mechanismem je případný nezanedbatelný podíl dalších příčin rozšíření čar, jejichž započtení by vedlo ke snížení odhadu koncentrace částic ve hvězdné atmosféře.