CHEMICKY PEKULIÁRNE HVIEZDY NA HLAVNEJ POSTUPNOSTI

Ján Budaj
Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica

1 Všeobecný astrofyzikálny kontext

Štúdium chemicky pekuliárnych (CP) hviezd bolo až do nedávna skutočne dosť špecifickým odvetvím a zdanlivo aj akosi bokom od ostatného stelárneho výskumu. Do istej miery tomu tak bolo v dôsledku používania častokrát svojských metód determinovaných špecifickými vlastnosťami zmienených objektov. V súčasnosti, keď už stelárna stavebnica vzniku a vývoja hviezd poodhalila výraznejšie kontúry, už je to práve naopak. Množstvo poznatkov odkrytých pri štúdiu CP hviezd sa teraz už úspešne využíva v oveľa širšom kontexte. Skúmanie chemického zloženia a jemných efektov stratifikácie prvkov je motorom rozvoja stelárnych spektroskopických metód čo následne podmieňuje aj výrazný pokrok v teoretickom modelovaní hviezdnych atmosfér. Difúzia chemických prvkov pod vplyvom tlaku žiarenia nachádza ďalšie aplikácie napr. u hviezd sp. typu F pri objasňovaní príčiny lítiovej medzery, pri modelovaní chemických anomálií podtrpaslíkov, bielych trpaslíkov i samého Slnka atď. Techniky "Doppler imaging" sa už využívajú pri mapovaní povrchu chromosféricky aktívnych hviezd a zákrytových dvojhviezd. Asteroseizmológia a štúdium neradiálnych pulzácií je ďalšou interdisciplinárnou perspektívnou oblasťou so závažným dosahom mimo rámec CP hviezd. Samotný magnetizmus hviezd, objavený Babcockom u Ap hviezd a študovaný najväčšími ďalekohľadmi sveta, nepriamo viedol nielen k objaveniu globálneho magnetického poľa Slnka, ale v súčasnosti aj k štúdiu magnetických polí bielych trpaslíkov a iných objektov na tých istých ďalekohľadoch, využívajúc často tie isté metódy. CP hviezdy sa teda stávajú unikátnym laboratóriom umožňujúcim vidieť dôsledky procesov, ktoré príroda dômyselne zamaskovala u ostatných hviezd, v plnej nahote. Našťastie je táto oblasť v širšej astronomickej verejnosti nie veľmi populárna. Nemôžeme však očakávať od hviezd na hlavnej postupnosti efektné, enormné a rýchle výmeny a uvoľňovanie energie, ide spravidla skôr o jemnôstky nad hranicou pozorovacieho šumu, vyžadujúce často drahé a neštandardné prístrojové vybavenie, veľké ďalekohľady, výborné pozorovacie podmienky alebo hlboké teoretické zázemie.

2 Súčasný pohľad na problematiku CP hviezd

Chemicky pekuliárne (CP - chemically peculiar) hviezdy tvoria značne heterogénnu skupinu hviezd na hlavnej postupnosti (MS - main sequence). Sú špecifické svojim anomálnym chemickým zložením, čím sa obyčajne myslí relatívne zastúpenie prvkov vzhľadom na vodík, pri porovnaní so Slnkom. Inými základnými hviezdnymi parametrami (hmotnosť, svietivosť, polomer,...) sa nezdajú na prvý pohľad odlišné od normálnych hviezd. Už to dáva tušiť, že nemáme dočinenia s efektmi ovplyvňujúcimi zásadným spôsobom vnútornú stavbu hviezdy. Skôr len s akýmisi chybičkami krásy na pokožke - atmosfére hviezdy.

Asi najzákladnejším aspektom CP hviezd teda je 'viera' (zatiaľ si to nemôžeme priamo overiť), že ich chemická pekuliarita je viazaná len na povrchové vrstvy inak normálnej hviezdy na MS. Máme na to viaceré závažné dôvody. Okrem toho, že sme schopní do istej miery definovať hviezdy blízko MS na HR diagrame aj pomocou zmienených základných hviezdnych parametrov, sú a boli to hlavne tieto argumenty, ktoré hrajú dôležitú úlohu v pochopení CP fenoménu:

- vysoká frekvencia výskytu CP hviezd medzi inými podobnými normálnymi hviezdami (často až niekoľko desiatok percent čo je ťažké v rámci súčasných modelov evolúcie hviezd vysvetliť inak ako efektmi na MS, kde hviezdy zotrvávajú väčšinu svojho života);
- efektívnou teplotou hviezdy a gravitačným zrýchlením na povrchu (t.j. atmosférickými parametrami) ohraničená oblasť ich výskytu v HR diagrame;
- ďalej to, že nie sú známi ich chemicky pekuliárni predchodcovia ani potomkovia;
- ich prítomnosť v blízkosti normálnych hviezd či už v dvojhviezdach alebo otvorených hviezdokopách či hviezdnych asociáciách;
- enormné nadbytky niektorých prvkov, až také, že keby takéto nadbytky boli v celej hviezde,

CP hviezdy by pri vzniku alebo v procese evolúcie museli v sebe nakopiť porovnateľné množstvo daného prvku ako všetky ostatné hviezdy v Galaxii dohromady.

Ktoré hviezdy ale môžu potenciálne vykazovať takúto anomáliu, či pekuliaritu? Zdá sa, že sa môže vyvinúť len vo výnimočne stabilných atmosférach stratifikáciou chemických prvkov. Táto by mala vznikať hlavne ich difúziou pod vplyvom tlaku žiarenia (Michaud 1970) a radu ďalších efektov. Ióny získavajú žiarivé zrýchlenie prenášaním hybnosti absorbovaných fotónov. Následkom žiarivého, gravitačného a iných zrýchlení a v dôsledku zrážok v prostredí potom prvky difundujú istou rýchlosťou a smerom v atmosfére hviezdy. Napríklad sú vytláčané nahor do atmosféry ak prevažuje žiarivé zrýchlenie alebo klesajú nadol ak preváži gravitačné usadzovanie. Zatiaľ sú však známe tiež dva iné procesy, ktoré stabilitu atmosféry výrazne obmedzujú a sú schopné zabrániť akejkoľvek stratifikácii prvkov v prostredí (Alecian & Vauclair 1983): (1) konvekcia alebo akákoľvek v súčasnosti priamo pozorovateľná turbulencia (napr. mikroturbulencia); (2) silné hviezdne vetry. U normálnych A hviezd rozoznávame niekoľko druhov povrchových konvektívnych zón (SCZ-superficial convective zone): vodikovú, HeI a He II SCZ podľa toho, ionizáciou akého atómu daná zóna vzniká. HeII SCZ sa nachádza najhlbšie, nad ňou je prechodová vrstva, ktorá, ako sa ukazuje, by mala byť premiešavaná prenikajúcou konvekciou zospodu (convective overshooting). Ešte vyššie sú H a HeI SCZ. U CP hviezd sa navyše môže objaviť nový druh - Fe SCZ (viď Obr.1). Hĺbka povrchových konvektívnych zón narastá smerom k neskorším spektrálnym typom a zasahuje významnú časť hviezdnej hmoty už pri stredných F hviezdach, zatiaľ čo hviezdne vetry su úplne evidentné u O a skorých B hviezd. Takže rizikovými skupinami pre vznik CP fenoménu sú stredné B, A, až skoré F hviezdy.

Najdôležitejším parametrom, ktorý rozhoduje o vzniku pekuliarity v zmienej oblasti HR diagramu sa zdá byť rotácia hviezdy a rôzne nestability s ňou súvisiace, ktoré sú zdrojom dodatočného premiešavania materiálu. Najprecíznejšie výpočty Charbonneaua & Michauda (1991), založené na modeloch meridionálnej cirkulácie (Tassoul & Tassoul 1982), ktorá sa snaží vyhladiť potenciálnu stratifikáciu prvkov, ukazujú, že héliová povrchová konvektívna zóna sa stráca (za rádovo 10^6 rokov) v dôsledku gravitačného usadzovania He v takých hviezdach, ktoré na rovníku rotujú pomalšie ako $v_e \approx 90$ km/s. Potom difúzia môže fungovať oveľa intenzívnejšie v menších hĺbkach pod vodíkovou povrchovou konvektívnou zónou, kde sú zrážky značne zriedkavejšie v dôsledku menšej hustoty látky.

Základným kameňom súčasného štúdia CP hviezd je ich moderná klasifikačná schéma (Preston 1974), ktorá jasne vyčleňuje nemagnetickú vetvu Am a HgMn hviezd a magnetickú vetvu Ap a niektorých He-weak hviezd. Nie je možné tu detailne popisovať vlastnosti rôznych typov, ktoré dobre zosumarizovali v dizertačných prácach Zverko (1973), Mikulášek (1980), Žižňovský (1986), Hric (1987), Zboril (1997) a Budaj (1998). Tabuľka 1 schematicky zhŕňa základné rozpoznávacie fakty o najrozšírenejších predstaviteľoch oboch vetiev, Am a Ap hviezdach, ktorými sa odlišujú od normálnych hviezd v príslušnej časti HR diagramu. Ap hviezdy sú snáď najexotickejsie objekty na MS. Spravidla vykazujú silné veľkoškálové magnetické polia a s nimi súvisiace obrovské škvrny s enormným nadbytkom alebo deficitom niektorých prvkov (viď. Obr.2, 3). Poznamenávame, že u normálnych hviezd nie sú detegované magnetické polia a približne 50% z nich sa nachádza v dvojhviezdach. V tabuľke tiež uvádzame už známe procesy, ktoré potenciálne môžu byť pôvodcami zmienených charakteristických znakov. Zatiaľ čo v súčasnosti už máme v rukách sľubné vysvetlenia pôvodu anomálie chemického zloženia alebo pomalej rotácie CP hviezd, nie je tomu tak v prípade ich magnetizmu a dvojhviezdnosti. Oba tieto fenomény sa obyčajne považujú za 'prapríčinu' vzniku CP hviezd v im vymedzenej oblasti HR diagramu, pričom aj pomalá rotácia CP hviezd, ktorá sa všeobecne považuje za viac menej priamu príčinu tohoto fenoménu sa dáva do súvisu s 'prapríčinou' ako dôsledok slapového alebo magnetického brzdenia rotácie hviezdy. Príčina tejto 'prapríčiny' ostáva zatiaľ dosť zahmlená.

3 Výskum v tejto oblasti na Astronomickom Ústave SAV

Problematika chemicky pekuliárnych hviezd je moderná oblasť astrofyziky, ktorá sa vo svetovom meradle rozvíja hlavne od 50-tych rokov a zásluhou dr. Zverka, od 70-tych rokov minulého storočia aj u nás, ako jeden z najmladších výskumných smerov na Astronomickom ústave SAV. Na našom pracovisku sa zameriavame hlavne na spektroskopiu ale aj na fotometriu CP objektov a počítačové simulácie difúznych procesov. Na Slovensku bohužiaľ nemáme možnosti na získavanie spektier a sme odkázaní na spoluprácu so zahraničím. Spektrá sa potom u nás redukujú a analyzujú. Nasledujú výpočty modelov atmosfér t.j. chodu teploty, tlaku, koncentrácie elektrónov, prípadne populácií jednotlivých atómových hladín s hĺbkou. Z nich sa potom počítajú syntetické spektrá t.j. teoretické rozdelenie vyžarovanej energie v závislosti od vlnovej dĺžky (Hubený 1988). Porovnávaním syntetických spektier s pozorovaniami môžeme spätne overovať správnosť modelu a ďalšou interpretáciou určovať mnohé fyzikálne parametre hviezd (dvojhviezd,...): efektívne teploty, hmotnosti, polomery, rýchlosť rotácie, turbulenie ale aj chemické zloženie, či magnetické polia alebo orbitálne elementy dráhy. Na fotometriu využívame dva 60cm ďalekohľady s fotoelektrickými fotometrami: na Skalnatom Plese a v Starej Lesnej. Pracuje sa hlavne v uvby a UBVR fotometrických systémoch. Pretože obrovské škvrny na Ap hviezdach sa prejavujú nie len v magnetických a spektroskopických meraniach, ale aj harmonickým, rotáciou hviezdy modulovaným kolísaním jasnosti v široko pásmových filtroch, táto metoda nám slúži hlavne na presné určovanie rotačných prípadne orbitálnych periód ako aj mapovanie škvŕn na týchto hviezdach.

Použitá literatúra

Alecian G., Vauclair S., 1983, Fundamentals of Cosmic Physics 8, 369
Budaj J., 1998, dizertačná práca
Budaj J., 1999, MNRAS 310, 419
Charbonneau P., Michaud G., 1991, ApJ 370, 693
Hatzes A.P.,1996, in: Stellar Surface Structure, eds. K.G. Strassmeier and J.L.Linsky, Kluwer Academic Publishers, IAU, p. 305
Hric L., 1987, dizertačná práca
Hubený I., 1988, Comput. Phys. Comm. 52, 103
Michaud G., 1970, ApJ 160, 641
Mikulášek Z., 1980, dizertačná práca
Preston G.W., 1974, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 12, 257
Richard O., Michaud G., Richer J., 2001, ApJ, 558, 377
Tassoul J.L., Tassoul M., 1982, ApJS 49, 317
Zboril M., 1997, dizertačná práca
Zverko J., 1973, dizertačná práca
Žižňovský J., 1986, dizertačná práca

Obrázok 1: Príklad možnej štruktúry a vývoja konvektínnych zón v hviezde s $M = 2.5M_{\odot}$. Čiernou su znázornené konvektívne a bielou žiarivé zóny. Od povrchu postupne nasledujú: HI SCZ, $\alpha-$HeI, $\beta-$HeII a $\gamma-$Fe. Dole je $\epsilon-$konvektívne jadro hviezdy. Prevzaté z Richard et al. (2001, Fig.8c, p.385).

Obrázok 2: Rozloženie kremíka po povrchu hviezdy γ^2Ari, nadbytok – biela, deficit – čierna farba. Prevzaté z Hatzes (1996, Fig.2, p.310).

Obrázok 3: Rozloženie povrchového magnetického poľa po povrchu hviezdy γ^2Ari. Oblasti s dominantným horizontálnym magnetickým poľom – biela, vertikálnym poľom – čierna farba. Prevzaté z Hatzes (1996, Fig.9, p.316).

Tabuľka 1: Schématický súhrn rozpoznávacích znakov CP hviezd a známych efektov, ktoré sa potenciálne spolupodieľajú na ich vzniku. Prevzaté z Budaj (1999, Tab.1., p. 420)

znak	**Ap**	**Am**	**potenciálny pôvodca**
anomálie chemického zloženia	Áno	Áno	difúzia, konv. zóny, hv. vetry, mag. polia, rotácia hv.
pomalá rotácia	Áno	Áno	selekcia rot. miešaním, slapové a mag. brzdenie
mag. polia	Áno	Nie	?
dvojhviezdnosť	Nie	Áno	?