

Zářiví poslové z hvězd

Seminář ve Valašském Meziříčí

18. – 20.10.2019

Jakub Fišák

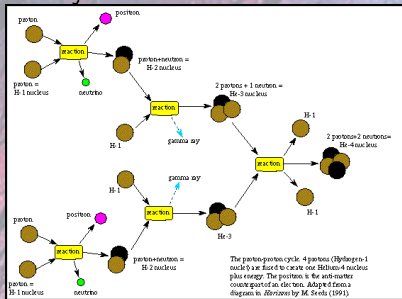
Co to jsou hvězdy?

Původní domněnky:

- bohové
- každá hvězda se nachází na sféře
- ovlivňují naše životy – astrologie
- neměnné objekty

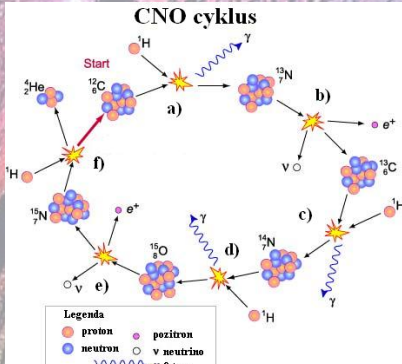
Dnešní definice hvězdy: Gravitačně vázaný objekt, ve kterém alespoň po nějakou dobu probíhaly termonukleární reakce.

Hvězdy v našich životech



chemické složení naší planety

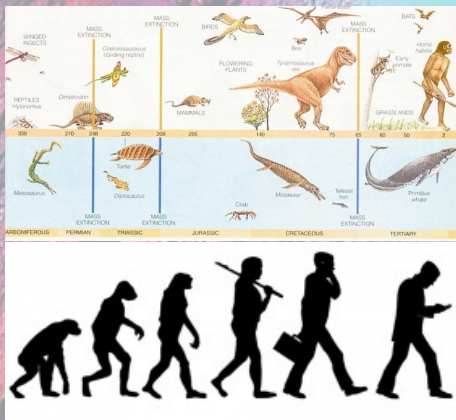
Všechny prvky, ze kterých jsme složeni, od Lithia až po železo vznikly termojadernými reakcemi ve hvězdách. Prvky těžší než železo vznikly v supernovách.



Periodic Table of the Elements

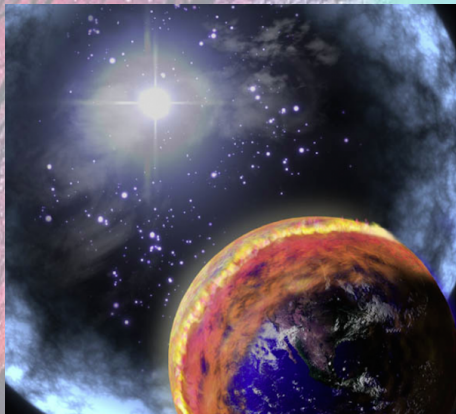
1	2											3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100																																																																						
H	He																	B	C	N	O	F	Ne											Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar											K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr											Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe											Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu											Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr											101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne											Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar											K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr											Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe											Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu											Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr											101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu											Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr											101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118																																																																																																																

Hvězdy v našich životech



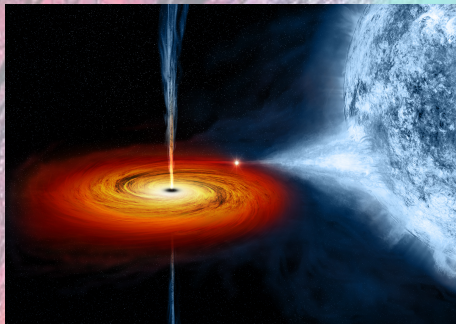
■ **evoluce života**
Záření z hvězd (např. UV), dokáže ničit vazby v DNA, a přispívat tak k mutacím, z nichž některé mohly být pro živočichy výhodné.

Hvězdy v našich životech



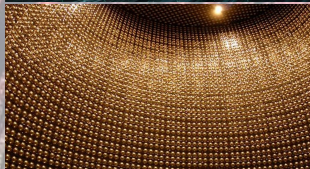
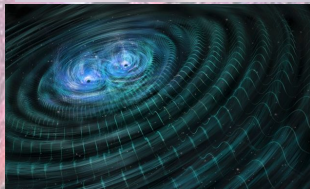
- hromadná vymírání
Hvězdy jsou pro Zemi dost nebezpečné. Jedním nebezpečným typem hvězd jsou supernovy, které by Zemi dokázaly efektivně sterilizovat i na velkou vzdálenost.

Hvězdy v našich životech



- mohly by zničit Sluneční soustavu

Metody výzkumu vesmíru



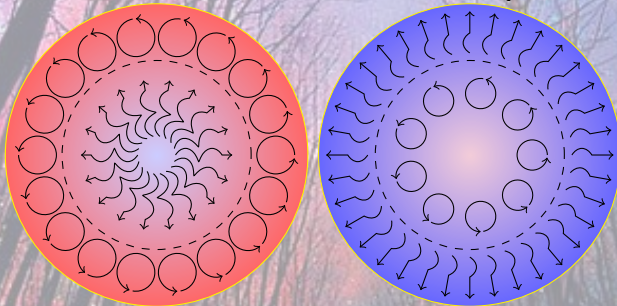
- materiál
- gravitační vlny
- neutrina
- fotony

Nejvíce informací získáváme z přicházejícího záření, odkud lze zjistit spoustu zajímavých informací o hvězdě. Můžeme také sestavit numerický model, a přicházející záření spočítat analyticky. Potom lze zjistit mnohem více informací.

Co víme o hvězdách?

Hvězdy jsou...

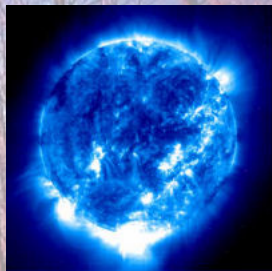
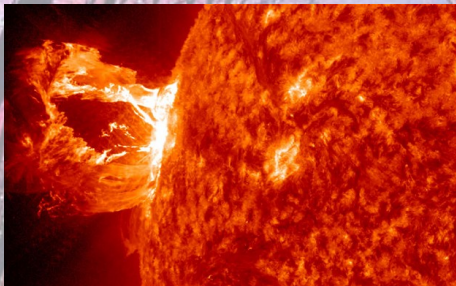
- od nás různě vzdálené,
- v čase se vyvíjí,
- ovlivňují naše životy, ale jinak, než popisuje astrologie.
- Dřívější rozdělení: rané a pozdní hvězdy
- Aktuální rozdělení: horké a chladné hvězdy



Co víme o hvězdách?

Hvězdy jsou...

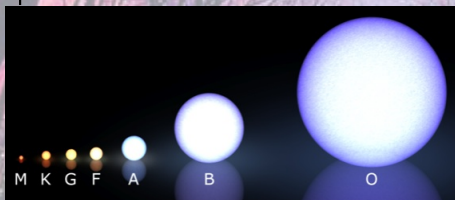
- od nás různě vzdálené,
- v čase se vyvíjí,
- ovlivňují naše životy, ale jinak, než popisuje astrologie.
- Dřívější rozdělení: rané a pozdní hvězdy
- Aktuální rozdělení: horké a chladné hvězdy



Co víme o hvězdách?

Hvězdy jsou...

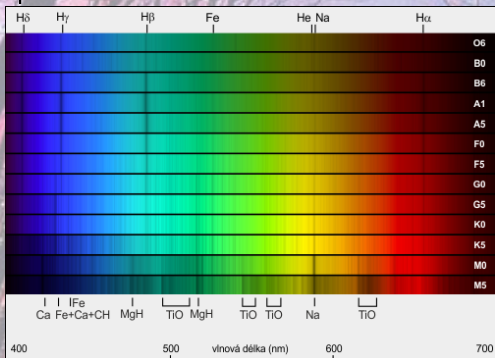
- od nás různě vzdálené,
- v čase se vyvíjí,
- ovlivňují naše životy, ale jinak, než popisuje astrologie.
- Dřívější rozdělení: rané a pozdní hvězdy
- Aktuální rozdělení: horké a chladné hvězdy
- spektrální klasifikace

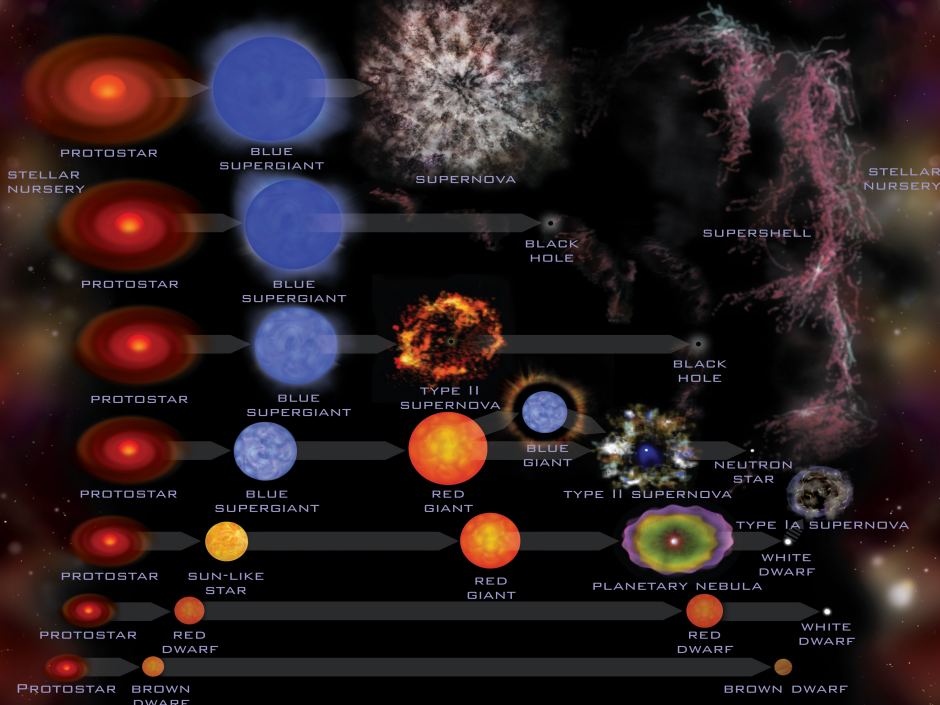


Co víme o hvězdách?

Hvězdy jsou...

- od nás různě vzdálené,
- v čase se vyvíjí,
- ovlivňují naše životy, ale jinak, než popisuje astrologie.
- Dřívější rozdělení: rané a pozdní hvězdy
- Aktuální rozdělení: horké a chladné hvězdy
- spektrální klasifikace





STELLAR NURSERY

STELLAR NURSERY

PROTOSTAR

BLUE SUPERGIANT

SUPERNOVA

SUPERSHELL

BLACK HOLE

BLACK HOLE

PROTOSTAR

BLUE SUPERGIANT

TYPE II SUPERNOVA

NEUTRON STAR

BLUE GIANT

PROTOSTAR

BLUE SUPERGIANT

RED GIANT

TYPE II SUPERNOVA

TYPE IA SUPERNOVA

PROTOSTAR

SUN-LIKE STAR

RED GIANT

PLANETARY NEBULA

WHITE DWARF

PROTOSTAR

RED DWARF

RED DWARF

WHITE DWARF

PROTOSTAR

BROWN DWARF

BROWN DWARF

Jak daleko dohlédneme?

- Každý den je v krajině různá viditelnost závisující na počasí.
- Viditelnost závisí na střední volné dráze fotonu v daném médiu.
- Na jakých fyzikálních veličinách střední volná dráha fotonu závisí?
 - ▶ Frekvence fotonu,
 - ▶ pozice v prostoru.

- Máme

$$\chi(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \sim \frac{1}{\langle l_{\text{free}} \rangle}.$$

- Prostředí rovněž může emitovat záření.

Základní definice

- Opacita:

$$\chi(\mathbf{r}, \mathbf{n}, \nu, t),$$

- Emisivita:

$$\eta(\mathbf{r}, \mathbf{n}, \nu, t).$$

- obě dvě veličiny závisí na frekvenci (např. absorpce i emise v čarách může probíhat pouze v úzkém frekvenčním pásu)

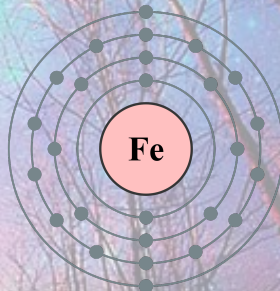
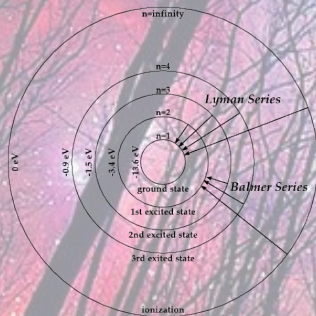
Opacita

- pravá absorpce
Dojde k přeskočení elektronu z jedné energetické hladiny na druhou. Opačný proces může být jak zářivý, tak srážkový.
- rozptyl
Elektron přejde na virtuální hladinu (nestabilní, není řešením Schrödingerovy rovnice) a ihned spadne na počáteční/jinou (fluorescence) hladinu. Důležitý je rovněž rozptyl na volných elektronech.

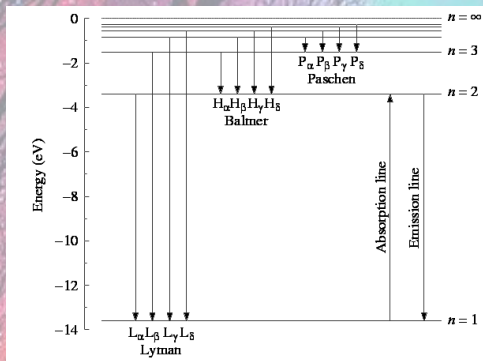
opacita and emisivita

- popisuje vlastnosti prostředí, kterým fotony prolétávají
- závisí na frekvenci fotonu, \vec{r} , t a směru
- dána kvantovou elektrodynamikou/mechanikou (elektronová struktura atomů a molekul)
- pro výpočet je nutné znát populace atomů v příslušných stavech

Atomová struktura

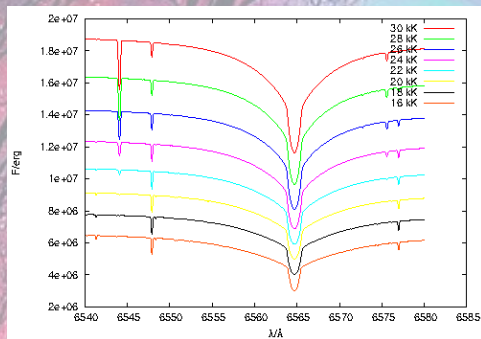


Absorpce v čarách



- silná závislost opacity na frekvenci
- z profilů a poloh čar lze vyčíst spoustu zajímavých informací
- železné čáry – silný pokrývkový jev v UV oblasti
UV fotony jsou pohlceny, energie se následně přetransformuje na kinetickou energii plazmatu, tedy k zahřátí látky. Plazma tedy funguje jako deka, díky které se spodní části ohřejí.

Absorpce v čarách



Čára $H\alpha$ s vlnovou délkou 6565 Angströmů v závislosti na efektivní teplotě modelu.

- silná závislost opacity na frekvenci
- z profilů a poloh čar lze vyčíst spoustu zajímavých informací
- železné čáry – silný pokrývkový jev v UV oblasti
UV fotony jsou pohlceny, energie se následně přetransformuje na kinetickou energii plazmatu, tedy k zahřátí látky. Plazma tedy funguje jako deka, díky které se spodní části ohřejí.

Absorpce v čarách

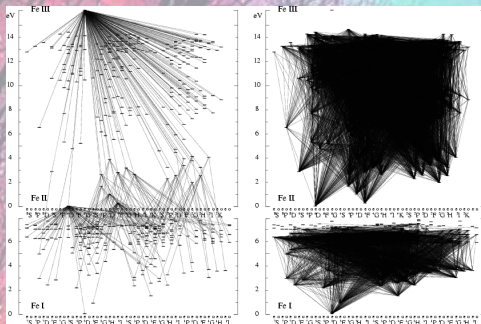
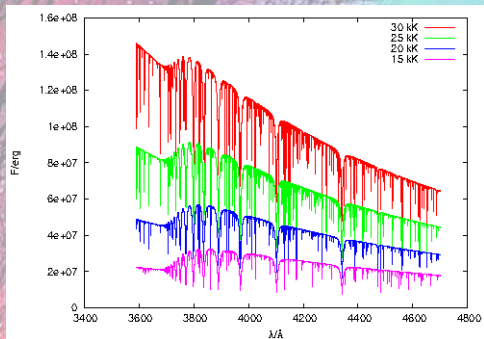


Schéma možných přechodů v iontech železa.

- silná závislost opacity na frekvenci
- z profilů a poloh čar lze vyčíst spoustu zajímavých informací
- železné čáry – silný pokrývkový jev v UV oblasti
UV fotony jsou pohlceny, energie se následně přetransformuje na kinetickou energii plazmatu, tedy k zahřátí látky. Plazma tedy funguje jako deka, díky které se spodní části ohřejí.

Ionizace a rekombinace



- způsobuje „skok“ v kontinuu
- např. Balmerův skok v atomu vodíku

Základní problém

Známe chemické složení, jak spočítáme spektrum hvězdy?

Pole záření určíme z RTE, pro jejíž vyřešení musíme znát opacitu a emisivitu prostředí

Jaká je populace iontů, hustota volných elektronů?

Určíme z rovnic statistické rovnováhy, jejíž koeficienty závisí na poli záření.

Výpočet populací iontů

■ LTE aproximace – vše závisí pouze na teplotě

- ▶ Boltzmannova rovnice – výpočet populací energetických hladin

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{g_i}{g_j} \exp\left(-\frac{E_i - E_j}{k_B T}\right) \quad (1)$$

- ▶ Saha rovnice – výpočet populačních iontů

$$\frac{n_{0,j+1,l}^*}{n_{j,l}^*} = \frac{2}{n_e} \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{g_{0,j+1,l}}{g_{0,j,k}}\right) \exp\left(-\frac{\epsilon_{lj}}{k_B T}\right). \quad (2)$$

■ NLTE aproximace

- ▶ rovnice statistické rovnováhy

$$\sum_i n_i P_{ij} - \sum_j n_j P_{ji} = 0. \quad (3)$$

(Magneto)Hydrodynamický model

- spočítá hustotu, teplotu, rychlostní pole

Model přenosu záření

- vstupem je již spočítaný model
- spočítá přenos záření skrze dané médium
- spočítá korekci teploty
- výstup: spektrum

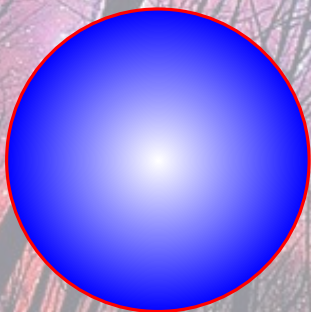
Zářivo-hydrodynamický model

- kombinace obou předchozích

Statické hvězdné atmosféry



Schéma sféricky symetrické atmosféry.



U hvězd hlavní posloupnosti je atmosféra svojí tloušťkou zanedbatelná oproti celkovému poloměru hvězdy.

- klasické hvězdné fotosféry
- planparalelní/sférická aproximace
- většina kódů už NLTE
- pro chladné hvězdy je výpočet složitější
- existující kódy
 - ▶ TLUSTY, SYNSPEC
 - ▶ ATLAS

Statické hvězdné atmosféry

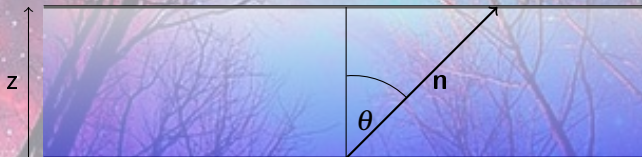
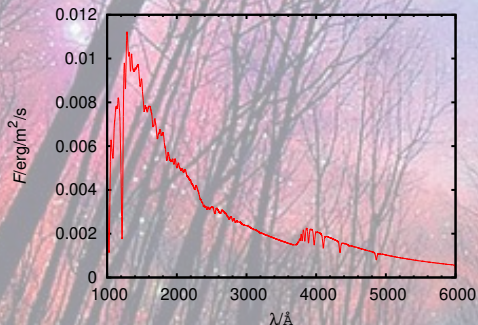


Schéma sféricky symetrické atmosféry.



Příklad spektra horké hvězdy.

- klasické hvězdné fotosféry
- planparalelní/sférická aproximace
- většina kódů už NLTE
- pro chladné hvězdy je výpočet složitější
- existující kódy
 - ▶ TLUSTY, SYNSPEC
 - ▶ ATLAS

Vítr horkých hvězd



- hvězda ztrácí část své hmoty prostřednictvím větru
- vítr ovlivňuje vývoj hvězdy, chemické složení galaxií, atd.

- dva globální parametry
 - ▶ \dot{M} – rychlost ztráty hmoty
 - ▶ v_∞ – terminální rychlost
- ve spektru pozorovány PCyg profily

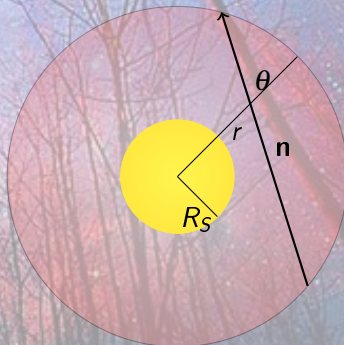
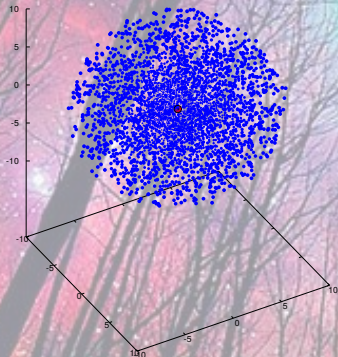


Schéma sféricky symetrické atmosféry.

Vítr horkých hvězd

■ hvězdný vítr není sféricky symetrický



■ může to být způsobeno

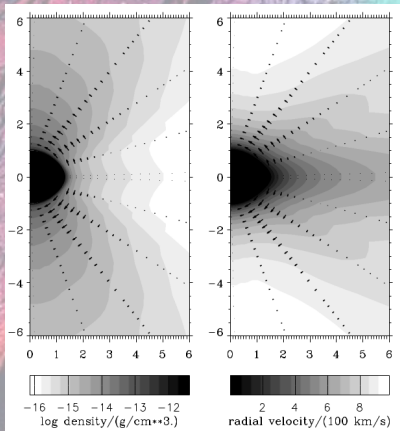
- ▶ rotací Puls et al. 1993, Petrenz & Puls 2000, Owocki 1994
- ▶ magnetickým polem Ud-Doula & Owocki 2015
- ▶ akrecí na kompaktní objekt
- ▶ nestabilita způsobená čárovými přechody

Šurlan et al., 2012, distribuce clumpů z 3D MCRT

kódu pro nehomogenní vítr, Kubátová 2018.

Vítr horkých hvězd

- hvězdný vítr není sféricky symetrický

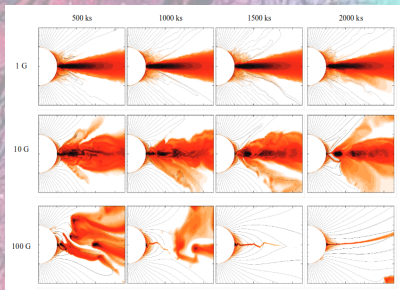


- může to být způsobeno
 - ▶ rotací Puls et al. 1993, Petrenz & Puls 2000, Owocki 1994
 - ▶ magnetickým polem Ud-Doula & Owocki 2015
 - ▶ akrecí na kompaktní objekt
 - ▶ nestabilita způsobená čárovými přechody

Hustotní a rychlostní struktura větru rotující hvězdy,

Vítr horkých hvězd

■ hvězdný vítr není sféricky symetrický



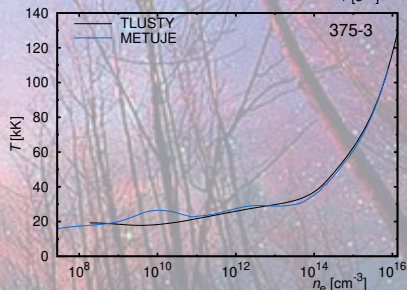
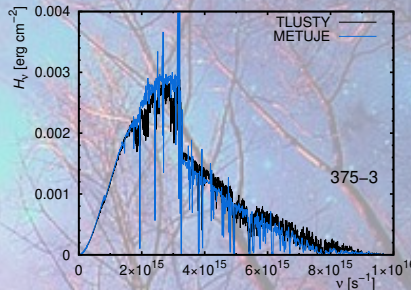
Vliv magnetického pole na hvězdný vítr, převzato z
ud-Doula et al. 2018

■ může to být způsobeno

- ▶ rotací Puls et al. 1993, Petrenz & Puls 2000, Owocki 1994
- ▶ magnetickým polem Ud-Doula & Owocki 2015
- ▶ akrecí na kompaktní objekt
- ▶ nestabilita způsobená čárovými přechody

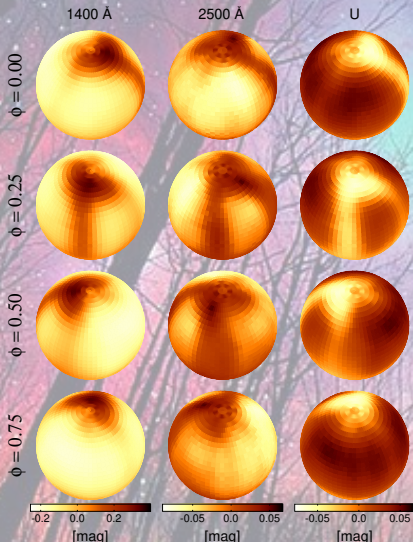
Komplexní modely atmosfér horkých hvězd

- Model Jiřího Krtičky
METUJE
- spojení modelu fotosféry s
modelem hvězdného větru
- sférická symetrie



Srovnání komplexního modelu (vítr + fotosféra) a modelu statické atmosféry TLUSTY. Nahoře vystupující záření, dole: teplotní struktura.

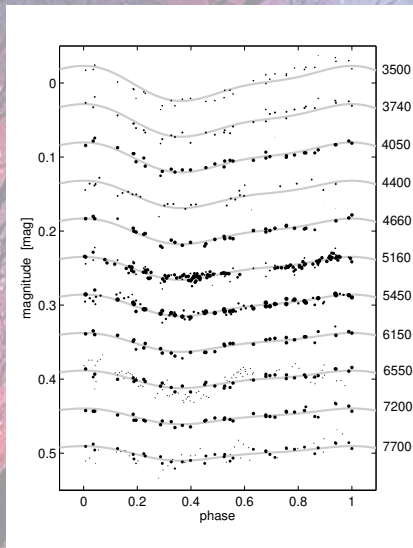
CP hvězdy



Jedním vysvětlením proměnnosti hvězd je, že rozložení prvků v atmosféře není homogenní, ale závisí na poloze. Na obrázku jsou abundanční mapy spočítané doktorem Prvákem.

- hvězdy s neobvyklými abundancemi určitých prvků
- většinou spektrální typ A
- klidné atmosféry, u kterých se může projevit zářivá difuze

CP hvězdy

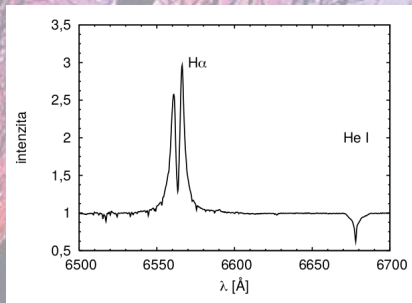


Světelné křivky spočítané doktorem Prvákem srovnané s napozorovanými daty.

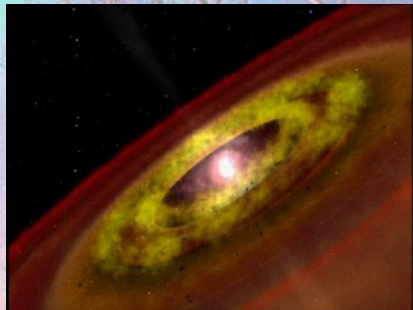
- hvězdy s neobvyklými abundancemi určitých prvků
- většinou spektrální typ A
- klidné atmosféry, u kterých se může projevit zářivá difuze

Hvězdné disky

- Be hvězdy
- není zatím znám přesný důvod vzniku disku
- u B[e] hvězd pozorovány zakázané čáry



Spektrum Be hvězdy s charakteristickým profilem čáry.



Supernovy



- expandující atmosféry
- vyvržená látka dosahuje rychlosti řádově tisíců km/s
- látka obsahuje radioaktivní jádra generující další záření, to je simulováno v některých MC kódech
- hydrodynamické kódy i MC kódy počítající přenos záření

Další objekty

