

Poznámky k predmetu F8670

1. Hvězdy spektrální třídy K

Aldebaran, Arcturus, oranžové až načervenalé, v jejich čárových spektrech pozorujeme molekulární čáry, u K obrů jsou dominantní zejména CN a CO, Zářivý výkon určujeme indikátorem - pás CN 421,6 nm. (chybí ve spektrech hvězd HP, objevuje se u obrov a následně již není pozorovatelný u veleobrů).

Rozdílnosti povrchových teplot v závislosti relativní intenzity absorpčních čar ve spektrech hvězd HP. chladné hvězdy- emisné čiary přítomny u absorpčních čar H a K Ca II

Wilson a V. Bappu – vzťah lineárnej závislosti magnitudy od log šírky chromosférických emisií čiar H a K Ca II (hvězdy s veľkou chromosférickou aktivitou)

$$M_V = (a \pm \delta a) \log W + (b \pm \delta b).$$

spektrální třídy M

$5 \cdot 10^{10}$ krát větší W ako najmenej jasné chladné hviezdy

veleobor Betelgeuse R = dráha Jupitera, spektrum obsahuje tisíce absorpčních čiar
veleobr Antares (R = dráha Jupitera)

červenní trpaslíci spektrální třídy M, okom nepozorovatelné ale početné v Galaxii
obri – premennosť, strata hmotnosti

červení obri, veleobri v stadiu před zapálením héliové slupky He I a II, sp. triedy M1–M6
OH/IR hvězdy – meno podľa slanej emise v čarách OH a vyžarování v infračervenej oblasti

dlhoperiodická premenná dvojhviezda - tisíce absorpčních čiar

Mira - (dvojhviezda s Omicron Ceti (bílý trpaslík) v Súhvezdí Velryby), R = dráha Marsu, perioda pulzov 300 dnů, změna jasnosti ve vizuální mag dosahuje (3 – 10) mag, zářivý výkon $W = 10^{2-3} L_S$

Miridy – teploty 2000K – zdroj infračer. žiarenia,

staří červení obři spektrálních tříd K, M, protáhlý tvar podobný vejci,

Pulzace mají svou příčinu ve slupce okolo vyhaslého jádra hvězdy

pulzácia (100 – 700) dnů, najčastejšie 300 dní, dovod – v šupke okolo vyhasnutého jadra sa Salpeterovou reakci zlučuje He na O a C, rychlost reakce závisí na T^{40} - periodické výbuchy, rázová vlna výbuchu dorazí k povrchu hvězdy, ktorý zahreje o stovky K, disociácia molekúl těžších prvkov, zo spektra zmizí ich absorpční pásy a hvězda sa zjasní

pomocou miríd - meranie vzdialenosti, lebo je známá ich křivka světelných změn a magnituda

chladné hviezdy s veľkými R - v centre vznik prvkov, znema chem. zloženia, konvekcia, povrch obohatený o produkty (prvky) TN reakcií
uhlíkové hviezdy - čistý produkt TN reakcií, prvky vytvárané při horení He v centre hvězd
Nie všetci obři spektrální třídy M sú **miridy** - β And M0 III - normální červený obor, nemaní sa vnútorná štruktúra, nie sú pulzácie.

Hviezdy - vývojová etapa obrov/veleobrov relativne rýchla, 10 – 100 milionů roků,
následná premena na na biele trpaslíky či neutronové hvězdy

Spektrální třídy L, T - predovšetkým **hnedí trpaslíci** – extrémne malý R, poznáme stovky, najnižšia teplota 700 K, zářivý výkon $10^{-6} L_{\odot}$.

spektrá CHV komplexné - velký počet molekulárních i atomárních čar
chladnejšie a väčšie hviezdy – dlhšia doba pulzácií
pulzace – potrebná zmena vnútornej štruktury hvězdy

2. Hvězdy do příchodu na hlavní posloupnost, FU Ori 1937, T Tauri

zastavenie rýchleho zmršťovania jadra, hlavná časť E sa uvoľňuje v jádre, nedostatočná T na TN reakcie, prenos E konvekciou, presúvanie hviezdy pozdĺž Hayashiho hranice, jadro v žiarivej rovnováhe, zmršťovanie objektu, zvýšenie T, zapálenie TN reakcií.

Protohvězdy v konvektívnom zmršťovaní – hviezdy T Tauri

Gravitačné kontrakcie, viriálová veta, zvýšenie U, Stefanov-Boltzmanov zákon $L = 4 \pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4$

Hviezdna atmosféra – štruktúru určuje g povrchové a T_{ef} , $L \sim R^2$

Konvektívna rovnováha – polytropná závislosť, homologická kontrakcia, slabá závislosť T_{ef} na M (pomer $d \ln = 1/6$)

Vyššie hmotnosti – prenos E **žiarením**, Henyeyho vývojová stopa, presun hviezdy v ľavej časti H-R diagramu

Okolie objektov – emisia OH- zárodočné prachoplynné mračno má malé hustejšie oblasti s $n > 10^{12}$ na m^3 , $T = 40$ K, spontánnou emisiou prechod molekúl na metastabilnú hladinu – vznik stimulovanej emisie.

pri OH – maserová emisia (1665-1667 MHz), vlnová dĺžka 18 cm

maserová emisia – potrebný zdroj E na inverzné obsadenie dvojice enegr. Hladiny molekúl, optický tlsté molekulárne mračno, stimulovaná > absorpcia = zosílí slabý tok žiarenia

FU Ori 1937 - Predtým slabá nepravidelná premenná hviezda, silný zdroj infra žiarenia

hviezda v oblasti H II, temných hmlovín (bohaté na T Tauri), na 200 dní zjasnenie zo 16 na 10 mag

predpoklad - mladá hviezda s prachoplynnou cirkumstelárnou obálkou s E, tlak žiarenia odfúkol obal, zvýšená T a L, žiari v optickom obore, polomer 20-25 R_S

realita – premennosť M svedčí o prestavbe fotosféry a vnútra hviezdy - nárast L, **fuory** – nestacionárne hviezdy v rannom štádiu vývoja

Larsen – dynamické modely do hydrostatickej rovnováhy

T Tauri – premenné hviezdy, názov po prototype T Tauri, poloha blízko molekulárných mrakov, optická

premenlivosť, silné chromosférické čiary, aktívne, premenlivé, T_C nízka na TN reakcie, silný hviezdny vietor, zo spektra - prebytok lítia - viac ako Slnko a hviezdy HP – intenzívna absorpčná čiara Li (na HP rýchlo vyhorí)

Vlastnosti - spektrálna trieda G, K, M

- prítomnosť H_α vápníku Ca II emisných čar Balmerovy série H

- intenzívne emisné čiary neutrálneho Fe I - špecifická zvláštnosť

Nejjasnější T Tauri hvězdy – v oblasti vzniku hviezd

mračná ako Taurus-Auriga (140 pc) Lupus (190 pc), Chameleon (160 pc)

Nejjasnější objekty L = 8 mag, typické L = 10 mag,

počet T Tauri asi 10^6 , hmotnosti 0,5-1,5 M_S ,

klasické CTTS – šírka H alfa > 1 nm, čiarovo slabé WTTS - šírka H alfa < 1 nm

fluorescencia – výrazná premenlivosť emisnej čiary, fluorescenčné čiary železa

T Tauri – nadmerné, žiarenie v modrej a infra oblasti spojitého spektra – nad fotosférou sa asi nachádzajú vrstvy s vyššou T

Hayashi – T Tauri majú rozsiahle konvektívne zóny, rýchlejší prenos ako v Slnku, mohutné emisné spektrum podmienené plazmou v mohutných chromosférach – neboli preukázané koróny s rentgenovým žiarením – teória nesedí

Mladé hviezdy v štádiu TT pretrvávajú asi 10^7 rokov, $M = M_S$

Model T Tauri – akrecia z prachoplynného diskovitého cirkumstelárneho disku – dovody prebytok E v infra oblasti, pozorovanie polarizácia žiarenia (dovod - rozptyl žiarenia na čistočkách prachu). V okolo mladých hviezd sa zachovávajú zbytky látky povodného mračna.

Mračno – disková akrecia, vnútorné vrstvy brzdené, padajú na hviezdu = uvoľňovanie E – pozorované efekty
Tempo akrecie, hrubnutie vnútornej časti (padanie častíc) – zatienuje hviezdu

Hviezdny vietor – stretáva sa so zbytkami protomračna, u mladých hviezd intenzívny, $10^{-8} M_{\odot}$ plynu za rok

Studium horenia Li pri prichode na HP - $L > 0,9 L_{\odot}$ - obsah lithia rovnaký $\log A(\text{Li}) = 3,1$

Potvrdené horenie Li pri prichode na HP – význam pri $0,5 L_{\odot}$ a $(0,9 - 0,2) M_{\odot}$

Nizky obsah Li – pri hviezdach T Tauri s nízkou rotáciou

3. Červení trpaslíci, Stavba, Spektra a atmosféry, Vývoj

Hviezdy HP tried M, od M0 ($T = 3\,900\text{ K}$) po M8 ($T = 2\,600\text{ K}$), chladnejšie triedy K
Barnardova hviezda – trpaslík M5, najväčší vlastný pohyb $10,27''/\text{rok}$

Hmotnosti - do $0,8 M_{\odot}$, $R = (0,1 - 0,7) R_{\odot}$, $\rho_c (10^3 - 10^6) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $T_c (10^6 - 10^7) \text{ K}$

90% hmoty v centre, H a He úplne ionizované, popis tlakovou ionizáciou a disociáciou

Viac ako 70% hviezd v okolí sú červení trpaslíci triedy M

Zdroj opacity v M sú molekuly TiO a VO, rotačné-vibračné pásy H₂O. infra časť obsahuje absorpčný pás CO.

Nízka teplota, vysoký tlak, určením izotopického pomeru $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 10$ sa zistí vek hviezdy, výpočty spektra pomocou programu Pavlenko 2000, predpoklad LTE, hydrostatickej rovnováhy,

T_c nízka $< 10^6 \text{ K}$ – pp reťazec, pomer $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ sa nemení

Pri $M > 0,8 M_{\odot}$ – prebieha CNO cyklus, zmena zastúpenia C,A,O

Atmosféry a spektrá M trpaslíkov sú málo citlivé na zmeny L – málo citlivé k detailom konvekcie, konvektívna zóna ustupuje s klesajúcou M, zmenšuje sa L, klesá fotosférická opacita.

Vývoj ČT

Najrozšírenejšie vo vesmíre, hviezda je plne konvektívna v podstatnej časti vývoja, vylučuje sa vznik veľkého gradientu T, ČT na HP asi viac ako 10^{10} rokov, až pri teplote $T = 8 \cdot 10^6$ je pp reťazec v rovnováhe

pomalé spaľovanie vodíka - majú enormne dlhú odhadovanú životnosť, červení trpaslíci nikdy nezažijú jadrovú fúziu hélia, takže sa nemôžu stať červenými obrami; zvolna sa zmršťujú a zahrievajú, až kým nepotrebnú všetok vodík

prechod na postupnosť nulového stáří (Zero Age Main Sequence – ZAMS)- u hviezd termonukleární reakcie

poprvé prispievajú 100 % k celkovému zářivému výkonu hviezdy

s nárastom L sa musí zvascovat R, povrchová T nerastie – výstup hviezdy pozdĺž postupnosti červených obrov

ČT s menšou M sa po odchode z HP nestanú červenými obrami, ale modrými trpaslíkmi

podmienky pre vývoj na červeného obra s nízkou M, limitná M na ČO je $0,16-1,2 M_{\odot}$

1. Nárůst zářivého výkonu jádra.

2. Existenci gradientu střední hmotnosti připadající na jednu částici μ mezi jádrem a obalem.

3. Existenci atmosférické opacity, která je rostoucí funkcí teploty.

4. Hnědí trpaslíci, Hvězdy nebo planety, Spektra a atmosféry, Vývoj charakteristik s časem

HT (šarlatové hvězdy) - je objekt, ve kterém za celou jeho historii neprobíhaly termonukleární reakce žádného typu, nízké povrchové teploty $T = 2000 \text{ K}$, že centrální teplota v nitru HT nikdy nedosáhne $T = 8 \cdot 10^6 \text{ K}$ na zapálení TN reakcí, iba krátká doba horenia deutéria (milióny rokov), nedostatočné zmrštenie – zabranuje e-degenerácia

Vnutorná stavba - úplne konvektívny

Overenie že je objekt HT – Li test – prítomnosť Li čiar a vek viac ako 100 mil rokov (Li vyhorí za 10^{13} rokov) plne vodivý povrch a vnútro, prítomnosť Li, $R = 10 R$ Jupitera, Výskyt v otvorenej hviezdokope Plejády,

hviezda - ak na nejakej etapě vývoje uvoľnená E při TN syntéze byla srovnatelná s energií vyzařovanou objektem

zavedenie najprv **triedy L** (2000 – 1500 K) - silný absorpční pás CrH a intenzivní čáry řídkých kovů Cs a Rb, široké čáry Ca a Na.

potom **triedy T** (1500 – 1000 K) – prvý objavený HT Gl 229B, R Jupitera

test spektier – metanový test – při $T = 2500 \text{ K}$ sú molekuly metanu zcela disociovány. Hvězda, v jejímž spektru jsou 24 pozorovány výrazné absorpční molekulové pásy metanu je příliš chladná, aby mohla být hvězdou HP klasifikácia HT:

M trpaslíci silnými pásy oxidů: TiO, VO, výrazná H α emise 656,3 nm, v pozdních detekovatelné absorpčné čáry Li 670,8 nm. V blízké infra oblasti výrazné čáry H₂O, CO, FeH

L trpaslíci - $T \text{ ef } 1300 - 2200 \text{ K}$, $L = 4 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-5} L_{\odot}$, pre optická spektrá charakteristické metalické hydridy jako např. CrH, FeH

T trpaslíci - výrazné čáry H₂O v blízké infra oblasti

Tc objektu závisí na hmotnosti, existují čtyři režimy

1. $M > 0,075 \text{ Ms}$, Tc je dostatečně vysoká, aby probíhala syntéza vodíku
2. $M < 0,075 \text{ Ms}$, Tc je příliš nízká, aby probíhala syntéza H – He - objekt hnědým trpaslíkem, hoří v něm Li
3. $M < 0,06 \text{ Ms}$, Tc je nízká pro hoření lithia, spektrální čáry lithia jsou pozorovatelné a podle lithiového testu jde o hnědé trpaslíky (Rebolo, Martin & Magazzu)
4. $M < 0,013 \text{ Ms}$, $M = 13 \text{ Mj}$ - limitní hodnota pro hoření D, při objektů s menšou M nedojde k zapálení D

Hlavné prvky u HT – H, He, O, C, N – silné absorpčné čiary, spektrálne utvory a prach su podstatné pre pozorované rozdelenie spektrálnej E

atmosférické modely -rozdělení spektrální energie L a T trpaslíků v rozsahu (0,6 – 5,0) μm .

prachové modely - v atmosféře, kde je přítomen prach, reprodukuje červenou část optického sp. až infračervenou spektra L trpaslíků, fotony absorbovány prachem, převyzařovány v dlouhovlnné oblasti spektra

kondenzační modely - atmosféra, v které se prach ukládá v nižších vrstvách, reprodukuje optická červená až infračervená a modrá infračervená oblast T trpaslíků Prach je lokalizován v opticky tlusté oblasti a fotony nejsou převyzařovány

Tyto dva extrémní případy modelů nemohou vysvětlit celý rozsah spektrálního rozdělení energie L/T objektů Proto - „vyrovnaný“ model, zahrnující oba předchozí

5. Hvězdy asymptotické větve obrů

závěrečné aktivní stadium vývoje většiny osamocených hvězd, které v centrálních částech niter ukončily spalování vodíku a helia.

Hvězdy **asymptotické větve obrů (AGB)** jsou proto zdrojem chemických prvků, kterými obohacují mezihvězdné prostředí a zásadním způsobem tak ovlivňují chemickou evoluci v galaxiích i vesmíru jako celku. mohutnými konvektivně proudy - v určitých fázích vývoje zasahují až k jádru hvězdy (TN reakce). Produkty hoření sú vzestupnými proudy vynášeny do povrchových vrstev, vzniká pozorované spektrum - změny chemického složení. Po vyčerpání H v jadře dojde k rychlému smršťování centrálních částí, nárůst T - na povrchu He jádra sa zapálí H - narostá hmotnost He jádra. hvězdy s $M \leq 4 M_{\odot}$ e- degeneracia, spomalí smršťování. S postupem slupkového vodíkového zdroje k povrchu roste hmotnost jádra M_c , klesá jeho poloměr. Hroucením se jádro dále zahřívá, roste teplota nejen jádra, ale i okolních oblastí. Zvyšuje se teplota aktivní vodíkové vrstvy a tím i celkový výkon termonukleárních reakcí. Zářivý výkon hvězdy proto narůstá stále rychleji. Hvězdná látka v centrálních oblastech hvězd s větší hmotností $M \geq 4 M_{\odot}$ se chová stále jako ideální plyn, tudíž se může smršťovat a zahřívát bez omezení. Na nárůst zářivého výkonu hvězda reaguje celkovou expanzí, vnější vrstvy chladnou, zářivý výkon hvězdy postupně roste. Hvězdy opouští hlavní posloupnost na HRD a přesouvají se do **oblasti větve červených obrů (RGB)**.

I. promíchávání - mohutné konvekce přináší do oblasti termonukleárního hoření čerstvé palivo dosiahnutie T = 100 mil. K v He jádre - zapálenie 3α reakcii, prudké zapálenie reakcií - **heliovém záblesku** (min - hod) - roste uvolňování E, narostá T, nikoliv však tlak - brání degenerace jádra - nemůže expandovat a ochlazovat se - L sa zvětší za minuty, začší sa V, **pokles hustoty odstraní degeneraci - ideální plyn - spalovanie He - C, N** - horizontální větve obrů, presun He - C, N do slupky, Nukleosyntéza He na C a O se přesune do slupky kolem jádra. Vrstva horiaceho H sa zahreje, výšenie L, Vnější vrstvy se nafouknou, klesne T povrch - hvězda 2x červeným obrem

asymptotické větvi obrů (AGB) - na HRD sa přimyká ke klasickým červeným obrům s He degenerovaným jádrem
premiesavanie na 38 strane

II. promíchávání a vynášení produktů nukleosyntézy z CNO cyklu do atmosfér hvězd. Hvězdy s menší hmotností však k II. promíchávání nedochází vůbec
Tempo heliových reakcií - umerné $\rho^2 T^{30}$

tepelné pulsy - v cyklech 10^5 roků střídá aktivita H a He vrstvy.

III. promíchávání - se znovu vynáší produkty TN hoření do atmosfér hvězd, může zde dojít ke změnám v poměru zastoupení C/O z 0,1 na 1 - vytvoření uhlíkovéj hviezdy

TP - AGB - tepelně pulsující hvězdy asymptotické větve obrů - horné vrstvy jsou v důsledku konvektivních proudů v neustálém pohybu silný hvězdný vítr, se ztráta až $10^{-7} M_{\odot}$ ročně. Další únik látky - pulzace, ve vnějších řídkých vrstvách přecházejí v rázové vlny, které z nich vypuzují hmotu
AGB - konečná fáza asi 50% hviezd

Stavba - jádro červených obrů - malé a horké elektronově degenerované, $T = 10^8$ K, hmotnost M_c v rozmezí (0,6 - 1,4) M_{\odot} , poloměr 10^7 m, hustota 10^9 kg.m⁻³, složené z produktů předcházejícího hoření, tedy C, N, O a Ne.

Kolem - výrazně chladnější obal na H, R = až 1 AU. A T ef = 2 500 K

Obal přechází v rozsáhlou (desítky AU), velmi řídkou, chladnou (desítky K) a komplikovanou okolohvězdnou obálku, z unikajícího plynu a prachu - jádro sa objaví jako hustý a horký bílý trpaslík

Pociatocná $M \leq 0,8 M_{\odot}$ nedokončí spalování H

$M < 0,5 M_{\odot}$ e- degenerace zabrzdí další vývoj po absolvování stadia hvězdy na HP - nedostatočná T

$M \geq (6 - 8) M_s$ - podmínky pro zapálení dalších TN reakcí, při kterých hoří C, O na těžké prvky až po prvky Fe
atmosféra - hlavním typem přenosu energie - záření. Interakce mezi zářením a látkou:
- absorpce (v povrchových vrstvách , hlavním příspěvkem je $\rightarrow H-H$, v hlubších vrstvách H) a
Rayleighův rozptyl $H\alpha$, vše kontinuu, $\rightarrow H$, čárová absorpce, absorpce prachem

Odnávanie obalu, zvacovanie prachových zrn, klesá plynová opacita, rastie prachová
velikost zrn \ll vlnová délka světla, tvar křivky opacity $\chi(\lambda)$ je nezávislý na velikosti zrn!

6. Červení obři, Proč se hvězdy stávají ČO, Spektra a atmosféry červených obrů

SB vzorec $L = \dots$, problém zářivého výkonu, vývoj hvězdy - zvětšování svého L , řešení:

1. hvězda zvětší svoji velikost (R) - stane se červeným obrem
2. může narůstat T - stane se modrým trpaslíkem

$\kappa = konst. \rho^\alpha T^\omega$ Ak je hvězdná fotosféra v blízkosti opacitní limity, kdy je opacita rostoucí funkcí teploty,

$\frac{\Delta R}{R} \rightarrow \gamma^{-1} \frac{\Delta L}{L}$ potom je ω velké, $\Delta T \rightarrow 0$ tedy hvězda se stává červeným obrem.

Klasifikace proměnných červených obrů, založená na vizuálních světelných křivkách.

1. Miridy – velké amplitudy ($> 2,5$ mag V), proměnnost relativně pravidelná.

2. Polopravidelné proměnné – malé amplitudy, určitá periodičnost

3. Nepravidelné proměnné – malá periodičnost, chudé studie světelných křivek.

sít modelů založena na parametrech (sít modelů založena na parametrech (T_{ef} , $\log g$, M , Fe/H)).

platí $g = GM/R^2$, $L = 4 \pi R^2 \sigma T_{ef}^4$,

Modely atmosfér – zjednodušení TD vlastností prostředí, pokrývkového jevu, turbulencii

v atmosférách červených obrů jsou důležitým zdrojem neprůzračnosti molekuly, obsahující atomy C, N a O.

nezbytná znalost obsahu C, N, O a kovů – struktura modelu

základní model atmosféry s parametry T_{ef} , $\log g$, nezbytné řešit úlohu vzájemné závislosti - Odhady chemického

složení atmosfér musí být v souladu se strukturou atmosféry.

Sfericko-symetrické modely - I_v závisí:

a) vzdálenosti r od středu hvězdy

b) na úhlu ν mezi směrem záření a směrem rádius vektoru

modely fotosfér červených obrů předpokládaly existenci vody u M obrů s teplotami nižšími než 3 200 K, přesněji od $T_{ef} \approx 3 250$ K pro M6 III

Přítomnost vodních par v atmosférách K obrů a raných M obrů byla zcela neočekávaná a lišila se od tradičního obrázku atmosfér červených obrů skládajících se z **fotosfér, horké chromosfér** a **chladného větru**.

nedokonalé modely - předpoklady konvekce a turbulence a jejich interpretace nejsou zdaleka vyjasněny
členění na fotosféru, chromosféru a hvězdný vítr

7. Červení veleobři

Najznámejší - Cephei M 2 Ia, s teplotou 3 300 K, poloměrem 2 400 R_s a zářivým výkonem $6 \cdot 10^5 L_s$.

Dalsí – Betelgeuse, Antares

vývoj a pulzace červených veleobrů - limitováno komplexností jejich atmosfér, hvězdnými obálkami a jejich vzájemnou souvislostí, tj. dynamikou atmosféry, chromosférické aktivity a úbytkem hmoty. analýza rychlostní struktury atmosfér, byly nalezeny atmosférické pohyby, pravděpodobně konvektivního původu s rychlostmi korelujícími s úbytkem hmoty konvekce hraje klíčovou roli v úbytku hmoty veleobrů. bohatou nukleosyntézní aktivitou,

Červení veleobři (RSG) reprezentují klíčovou fázi vývoje hvězd s větší hmotností (pocítočná $M = 10-30 M_s$),

Pochopení problematiky červených veleobrů je stále ještě limitováno komplexností jejich atmosfér, hvězdnými obálkami a jejich vzájemnou souvislostí, tj. dynamikou atmosféry, chromosférické aktivity a úbytkem hmoty

Samotný vývoj hvězd ve stádiu červených veleobrů je ovlivňován mnoha faktory, například zvětšováním hmotnosti jádra a zářivého výkonu, intenzivním úbytkem hmoty atd.

Propočítané modely - teorie promíchávání při parametru promíchávání $\alpha = 1,0$,

Schwarzschildova a Ledouxova kritéria k určování hranic konvektivních zón.

hmota konvektivního jádra je kompletně promíchávána, teplotní gradient je adiabatický

Výpočet lineární pulzace předpokládá hvězdné modely v tepelné a hydrostatické rovnováze, vlastní pulzace jsou interpretovány jako poruchy statické stavební struktury

Úbytek hmot je u hvězd s velkou M značný- desítek procent pocítočnej M .

Předávaná hmota do mezihvězdného prostoru umožňuje recyklaci - základní prvok cyklu vývoja hmoty v Galaxii.

$$\log \frac{dM}{dt} = 1,32 \log T - 8,17, \text{ kde } T \text{ je ve dnech}$$

8. Uhlíkové hvězdy

možné testovat teorie hvězdného vývoje a nukleosyntézy.

klasifikácia spektroskopicky (závislost na I molekulárných pásů CN, C₂, CH) a podľa T_{ef}

C–R - teplejšie, (4 000 – 5 000) K, tedy rané C-hvězdy, vyznačujú menšie zářivé výkony, 2000 L_s, C/C < 10 odpovídají K hvězdám

C–N - Číslo za písmeny určuje teplotní posloupnost (od C-N1 až do C-N9), chladnější (3 000 K) s vysokými zářivými výkony (2 000 – 20 000) L_s, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \sim (20 - 80)$, odpovídají M hvězdám

C–H - teplejšie, T_{ef} (4 000 – 5 000) K, objekty chudé na kovy s hodnotami [Fe/H] z intervalu – 0,5 až – 2.0 nejstudovanější skupina, objekty s vyšší teplotou a poměrně chudé na kovy - stupeň blendování absorpčních čar je relativně menší

N hvězdy, tzv. normální uhlíkové hvězdy ukazují přeplněná, zhuštěná spektra - vyvoláno mohutnými molekulárními absorpčními pásy a nízkými T. V optickém oboru pouze několik intervalů vlnových délek je vhodných pro spektrální analýzu prvků.

Spektrum R a N hviezd podobné - detailnější analýza rozlišuje mezi ranými horkými R hvězdami (spektrální typy R0 – R4), které jsou podobné normálním K obrů (ι Dra) a pozdními chladnými R hvězdami (R5 – R8), více podobnými M hvězdám.

Uhlíkové hvězdy **typu J** - největší změny. Tyto hvězdy vykazují velmi mohutné CN a C₂ pásy a nahuštěná spektra

Poměr $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ je velmi nízký a blízký rovnovážnému (3, při CNO cyklu)

Termojaderné reakce nelze samozřejmě přímo detekovat, o jejich existenci a průběhu se však můžeme poučit z jejich účinků v atmosférách hvězd, z obohacování atmosfér produkty termojaderného hoření v nitrech. Příkladně zastoupení izotopu ^{13}C v atmosférách lze spektroskopicky odvodit z molekulárního spektra C₂, CN respektive CO, viz. obr

rovnováha mezi izotopy $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} - 89,2 : 1$ - Tento poměr se zachovává pro všechny hvězdy slunečního typu a obecně pro většinu hvězd kyslíkové posloupnosti

ale pro uhlíkové hvězdy - velký rozptyl poměru (nejmenší 2,5 – 10, nejvyšší v rozmezí 10 – 50)

Nízké hodnoty izotopického poměru $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ nelze u uhlíkových hvězd vysvětlit jinak než obohacením atmosfér zplodinami termojaderného hoření v centrálních oblastech hvězd. model hvězdy s termojaderným hořením He v jádře, z něhož se uhlíkové nuklidy dostávají konvektivními procesy do vnější částí hvězdy.

poměrem $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ nelze jednoznačně popsat termojaderné procesy v nitru hvězdy a tím ani její vývojový stupeň

Swanův pás - hlavním spektroskopickým poznávacím znakem uhlíkových hvězd, systém rotačně-vibračních pásů C₂ v modré oblasti spektra, dalším identifikačný znak - pásy CN v blízké infra oblasti.

nukleosyntéza v centre a opakované premiesavanie - v atmosférách AGB hvězd i C,N,O v dostatečném množství, v chladném prostředí T_{ef} < 3 500 K vytvárají jednoduché molekuly - šestici CO, CN, C₂, C₃, HCN a C₂H₂.

Molekula C₂ vytváří ve spektru několik základních systémů absorpcí:

Swanův systém ve viditelné oblasti spektra (řady molekulárních pásů rozprostírajících se od krátkovlnné části viditelného oblasti spektra až do blízké infračervené oblasti), Philipsův systém v blízké infračervené oblasti a Balík-Ramseyův systém v daleké infračervené oblasti.

Molekula CN vytváří sice vlastní systém molekulárních pásů i ve fialové oblasti spektra, ten je však u uhlíkových hvězd v důsledku intenzivní ultrafialové deprese v této části spektra obtížně měřitelný. Druhý červený molekulární systém příslušející molekule CN se rozprostírá od (700 nm - 1,5 μm)

Poměr $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ve spektrech uhlíkových hvězd byl určován z molekulárních pásů CN u celé řady hvězd

9. Dlouhoperiodické proměnné hvězdy, Vývojová stadia, Spektra a atmosféry,

Výklad pulzací, Úbytek hmoty

hvězdy typu Mira respektive miridy, heterogenní skupinu chladných hvězd, $T_{\text{ef}} 3000\text{--}3500\text{ K}$
Amplitudy světelných křivek – průměr 4-5 mag Vizualny obor, největší amplituda 14 mag
Hmotnost 1-2 M_{\odot} , perioda 200–500 dnů, $R = 150\text{--}350 R_{\odot}$

Efektivní teplota (2 800 – 3 000) K

C typ - bohaté na C ($C/O > 1$), ve spektrech dominují pásy molekul uhlíku C_2

M typ - bohaté na O ($C/O < 1$), v optické oblasti spektra výrazné pásy TiO

S typ hvězd ($C/O = 1$), který tvoří přechodový typ mezi 2 pásy, ZrO často doplněné silnými pásy TiO.
skupiny M a S - kyslíkové miridy

Eddingtonova záklopka - pulzace hvězdy je podmínkou existence zóny, jež akumuluje E při smršťování hvězdy a uvolňuje se při expanzi,
existence emisních čar Balmerovy série, jejichž intenzita se mění s periodou pulzací, Obecně se soudí, že čáry jsou excitovány rázovou vlnou, postupuje směrem vně atmosféry a emisní čáry, které jsou generovány, jsou méně deformovány překrývající absorpcí.

Zářivý výkon mirid s periodou 200 dnů je asi $4\,000 L_{\odot}$ a při $T = 400$ dnů je to $9\,000 L_{\odot}$

Atmosféry - odchylky od kruhové symetrie, vysvětlení - například rotace hvězdy, interakce s průvodcem případně existence různých skvrn, hypotéza spojená s rázovou vlnou způsobenou pulzací hvězdné obálky

Atmosféry mirid jsou velmi rozsáhlé. Důkazem je měření jejich průměrů ve vizuální a infračervené oblasti při zákrytech Měsícem

Velikost lineárního R také ovlivňuje povrchové g a průměrnou ρ hvězdy, Připomínáme první Michelsonovo měření fázovým interferometrem na Mount Wilson v roce 1921.

V případě dlouhoperiodických proměnných hvězd přesná hodnota průměru bude indikovat mod pulzace hvězdy.

Strukturu prachového obalu můžeme odhadnout za předpokladu, že jsou v termodynamické rovnováze a získávají teplo z centrální hvězdy. V tom případě platí absorbovaná záření = záření vyzařované ($L/4\pi R^2 = \sigma T_{\text{ef}}$)
Stav N LTE - hvězdné atmosféry, z nichž uniká záření do prostoru

dvě hlavní ionizační zóny.

První je za hranicí zóny, kde dochází k ionizaci neutrálního vodíku $H I \rightarrow H II$ a první ionizaci helia $He I \rightarrow He II$.

Tyto vrstvy leží v oblastech s charakteristických teplot $(1\text{--}1,5) \cdot 10^4\text{ K}$. Jsou souhrnně nazývány **vodíková částečně ionizovaná zóna**.

Druhá zóna ve větší vrstvě, umožňuje druhou ionizaci helia $He II \rightarrow He III$, což probíhá při charakteristické teplotě $4 \cdot 10^4\text{ K}$. Hovoříme o **He II částečně ionizované zóně**. Umístění těchto zón ve hvězdě předurčuje její pulsační vlastnosti. **Předpokládejme, že se zachovává tepelná energie, hovoříme tak o adiabatických pulzacích.**

nitřích hvězd existuje vrstva, v které sa zväčšuje neprůzračnost při stlačování, zatím co v celé hvězdě se zmenšuje, Výsledkem je, že **vrstva zadržuje energii, která přichází z centrálních částí hvězdy a absorbuje ji** - zahřívání této vrstvy – rozšiřování vrstvy. Na vnější výše ležící vrstvy tak působí větší silou. **Vrstva s $\gamma < 9/7$ funguje jako „záklopka“**, v okamžiku stlačování, smršťování zadržuje záření, pouze část energie je využita na podporu pulzací.

Pulzace můžeme v prvním přiblížení chápat jako akustické hustotní kmity s vlnovou délkou rovnou průměru hvězdy.

Miridy s $T_{\text{ef}} = 3\,000\text{ K}$ - vhodné objekty pro pozorování pomocí ISI (Infrared Spatial Interferometr), infračerveného prostorového interferometru

Vytvořený model o Ceti předpokládá existenci prachové slupky vzniklé na určité vzdálenosti s teplotou $1\,300\text{ K}$ a teplotním rozdělením odpovídajícím $21-r$ kolem sférické hvězdy vyzařující jako absolutně černé těleso o teplotě $2\,500\text{ K}$. Teplota $1\,300\text{ K}$ je horní limitou.

Emisní čáry Fe II respektive [Fe II] M-typu proměnných mirid jsou známy přes 60 roků. Jejich analýza poskytuje cenné údaje o hydrodynamických a termodynamických podmínkách v těchto pulsujících hvězdách. Vysocedisperzní spektra společně s NLTE modely umožňují výpočty přenosu záření v čarách.

Miridy jsou proměnné hvězdy s velmi dlouhou periodou pulzací. Periody pulzací se pohybují rozmezí mezi 80 dny a více než 1000 dnů a jsou téměř pravidelné, ale ne tak pravidelné jak je tomu u hvězd typu delta Cephei, nebo RR Lyrae. Amplitudy světelných křivek mirid jsou zpravidla větší než $2,5^m$ a mohou dosáhnout i více než 6^m . Jsou to staří červení obři spektrálních tříd K, M a mají protáhlý tvar podobný vejci. Vzhledem k nízkým teplotám na jejich povrchu jsou zdroji infračerveného záření.

Pulzace mají svou příčinu ve slupce okolo vyhaslého jádra hvězdy, ve které se Salpeterovou reakcí slučuje helium na kyslík a uhlík. Protože rychlost této reakce závisí na 40. mocnině teploty, jedná se spíše o periodické výbuchy, mezi kterými reakce pohasíná. Jakmile rázová vlna výbuchu dorazí k povrchu hvězdy, zahřeje ho o několik set K. To při jinak nízké povrchové teplotě hvězdy (asi 3000 K) způsobí disociaci molekul těžších prvků (například titanu nebo vanadu), takže ze spektra zmizí jejich absorpční pásy a hvězda se díky tomu zjasní. Po ochlazení dojde k rekombinaci, a jasnost hvězdy tak podstatně poklesne.^[1]

Pomocí Mirid lze **měřit vzdálenosti**, neboť je známá jejich křivka světelných změn i jejich absolutní hvězdná velikost

První hvězdou, u které byly výše zmíněné vlastnosti pozorovány byla Mira (o Ceti), dvojhvězda v Souhvězdí Velryby.

10. HV chladných hvězd, HV urychlovaný prachem, HV urychlovaný zvukovými vlnami

osamotené hmotných hvězdy s enormním L - masivní únik látky z hvězdy prostřednictvím hvězdného větru způsobeným účinky tlaku záření = citelný úbytek M, až několikanásobně zmenšení počáteční M hvězdy velmi silným hvězdným vietor - rozměrný červený obore, veleobor nebo hvězdou AGB s nízkým povrchoým gravitačním zrychlením.

Vypuzený materiál v okolí hvězd chladne, kondenzují zde prachové částice, které zmíněné hvězdy zahalují do neproniknutelného prašného závoje.

urychlovaný prachem

Vnější atmosféry chladných obrů velkých zářivých výkonů mohou být poháněny intenzivním polem záření hvězdných fotosfér. V případě chladných hvězd záření ovlivňuje hvězdný vítr, absorpce fotonů prachovými částicemi může formovat vnější atmosféry

Prachové částice mohou absorbovat záření z celého rozsahu vlnových délek, říkáme, že vítr u chladných hvězd je poháněný kontinuem. Úbytek hmotnosti dosahuje řádově $10^{-5} M_{\odot} \text{rok}^{-1}$, s rychlostmi v rozmezí (10 – 30) km.s⁻¹.

zářivé ČVO a hvězdy AGB – T_{ef} = 2000–3000 K, L = 10⁵ L_s - prach poháněný větrem,

nízká T - vznik prachových částic a jejich růst v horní části atmosfér,

velký poměr L a M umožňuje získat částicím g převyšující gravitační, což je požadováno pro vítr hnaný prachem

urychlovaný zvukovými vlnami

Konvektivní vrstvy generují akustické vlny vo fotosférách, šírenie vln směrem k povrchu energii, zvukové vlny produkované tlakovými silami v atmosférách a gradient tlaku vln - výsledok sil směřujících von a mohou akcelerovat (pohánět) hvězdný vítr (rozhodující zářivý výkon)

Výpočty modelů větrů akcelerovaných zvukovými vlnami s tlakem záření na prach mohou generovat podstatný úbytek M z chladných hvězd s nízkou hodnotou g (AGB)

korelace mezi rychlostí úbytku M a pulzační periodou hvězd ABG - pulzace mnohem důležitější než urychlování větrů akustickými vlnami, trojzložkový vietor - plyn, prach a pole záření. Prach ve tvaru sférických zrn prachu, zejména uhlíkových

najdoležitejším procesom formujúcim vietor – prenos momentu hybnosti z pola ziarenia na prach (akustickými vlnami alebo pohlcovaním pracovných čiastočiek)

Pulzary sú rotujúce neutrónové hviezdy, ktoré môžeme pozorovať ako zdroje elektromagnetického žiarenia. Intenzita žiarenia sa mení s pravidelnou periódou, čo sa zdôvodňuje rotáciou hviezdy. Neutrónová hviezda sa totiž točí tak rýchlo, že odstredivá sila tvaruje žiarenie, ktoré hviezda emituje, do kuželov pri rovníku, ktoré pravidelne, ako maják, zasahujú určitú časť vesmíru. Z toho dôvodu nemôžeme vidieť všetky existujúce pulzary, aj keby boli pomerne blízko, ale len tie, ktorých kužely nás pri otáčaní zasahujú.

Miridy jsou proměnné hvězdy s velmi dlouhou periodou pulzací. (80 dní a více než 1000 dnů), jsou téměř pravidelné. Amplitudy světelných křivek mirid jsou zpravidla větší než 2,5m a mohou dosáhnout i více než 6m. Jsou to staří červení obři spektrálních tříd K, M a mají protáhlý tvar podobný vejci.

Vzhledem k nízkým teplotám na jejich povrchu jsou zdroji infračerveného záření. Pulzace mají svou příčinu ve slupce okolo vyhaslého jádra hvězdy, ve které se Salpeterovou reakcí slučuje helium na kyslík a uhlík.

Protože rychlost této reakce závisí na 40. mocnině teploty, jedná se spíše o periodické výbuchy, mezi kterými reakce pohasíná. Jakmile rázová vlna výbuchu dorazí k povrchu hvězdy, zahřeje ho o několik set K. To při jinak nízké povrchové teplotě hvězdy (asi 3000 K) způsobí disociaci molekul těžších prvků (například titanu nebo vanadu), takže ze spektra zmizí jejich absorpční pásy a hvězda se díky tomu zjasní. Po ochlazení dojde k rekombinaci, a jasnost hvězdy tak podstatně poklesne.

viriálový teorém : $2\langle E_k \rangle + \langle E_p \rangle = 0$