

Jak hvězdy hubnou?

Jiří Krtička

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Masarykova univerzita, Brno

Hvězda – stálice?

- neměnná jasnost
- stálé místo na obloze vzhledem k ostatním hvězdám
- neměnná hmotnost

Hvězda – stálice?

- ~~• neměnná jasnost~~
- ~~• stálé místo na obloze vzhledem k ostatním hvězdám~~
- ~~• neměnná hmotnost~~
- proměnné hvězdy: mění svoji jasnost

Hvězda – stálice?

- ~~• neměnná jasnost~~
- ~~• stálé místo na obloze vzhledem k ostatním hvězdám~~
- ~~• neměnná hmotnost~~
- proměnné hvězdy: mění svoji jasnost
- hvězdy se vzájemně pohybují

Hvězda – stálice?

- ~~• neměnná jasnost~~
- ~~• stálé místo na obloze vzhledem k ostatním hvězdám~~
- ~~• neměnná hmotnost~~
- proměnné hvězdy: mění svoji jasnost
- hvězdy se vzájemně pohybují
- hvězdy mohou ztrácet svoji látku

Svědectví o změně hmotnosti

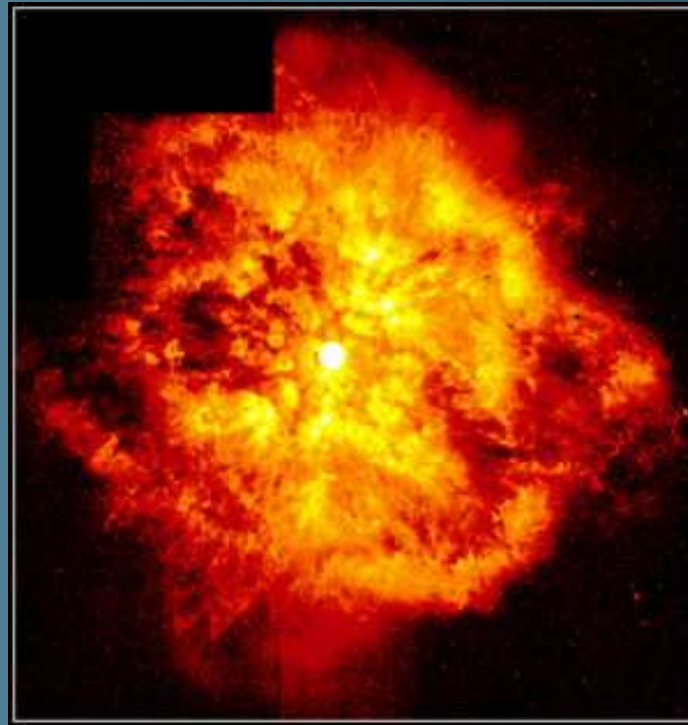
- obálky v okolí hvězd



mlhovina Abell 39

Svědectví o změně hmotnosti

- obálky v okolí hvězd



mlhovina v blízkosti hvězdy WR 124

Svědectví o změně hmotnosti

- obálky v okolí hvězd



mlhovina v okolí Miry (o Cet)

Svědectví o změně hmotnosti

- mezihvězdné prostředí



hvězdokupa NGC 3603

Korunní svědek: těžší prvky

- chemické složení raného vesmíru:
 - vodík, helium, velmi malé množství lithia
 - zcela chybí těžší prvky (C, N, O, Fe, ...)

Korunní svědek: těžší prvky



Korunní svědek: těžší prvky

- chemické složení raného vesmíru:
 - vodík, helium, velmi malé množství lithia
 - zcela chybí těžší prvky (C, N, O, Fe, ...)
- odkud se vzaly těžší prvky?

Korunní svědek: těžší prvky

- chemické složení raného vesmíru:
 - vodík, helium, velmi malé množství lithia
 - zcela chybí těžší prvky (C, N, O, Fe, ...)
- odkud se vzaly těžší prvky?
 - těžší prvky vznikají při termonukleárních reakcích v nitru hvězd

Korunní svědek: těžší prvky

- chemické složení raného vesmíru:
 - vodík, helium, velmi malé množství lithia
 - zcela chybí těžší prvky (C, N, O, Fe, ...)
- odkud se vzaly těžší prvky?
 - těžší prvky vznikají při termonukleárních reakcích v nitru hvězd
- jak se těžší prvky dostaly do mezihvězdného prostředí?

Korunní svědek: těžší prvky

- chemické složení raného vesmíru:
 - vodík, helium, velmi malé množství lithia
 - zcela chybí těžší prvky (C, N, O, Fe, ...)
 - odkud se vzaly těžší prvky?
 - těžší prvky vznikají při termonukleárních reakcích v nitru hvězd
 - jak se těžší prvky dostaly do mezihvězdného prostředí?
- ⇒ musí existovat způsob, kterým hvězdy přicházejí o určitou část své hmoty

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- kinetická energie látky musí být dostatečně velká

$$E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} \geq 0$$

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- kinetická energie látky musí být dostatečně velká

$$\frac{1}{2}mv^2 - G\frac{mM}{R^2} \geq 0$$

- m je hmotnost látky
- M je hmotnost hvězdy
- R je poloměr hvězdy

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- kinetická energie látky musí být dostatečně velká

$$v \geq v_{\text{únik}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

- $v_{\text{únik}}$ je úniková rychlost

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- kinetická energie látky musí být dostatečně velká

$$v_{\text{únik}} = 620 \text{ km s}^{-1} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-1/2}$$

- M_{\odot} je hmotnost Slunce
- R_{\odot} je poloměr Slunce

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- srovnání:

$$v_{\max} = 200 \text{ km hod}^{-1} \approx 9 \times 10^{-5} v_{\text{únik}}(\odot)$$



lokomotiva E109 (Škoda Plzeň)

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- srovnání:

$$v_{\max} = 935 \text{ km hod}^{-1} \approx 4 \times 10^{-4} v_{\text{únik}}(\odot)$$



letoun L159 Alca (Aero Vodochody)

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- srovnání: $v_{\max} \approx 10 \text{ km s}^{-1} \approx 10^{-2} v_{\text{únik}}(\odot)$



raketa Ariane 5 (ESA)

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

ztráta hmoty *samostatné* hvězdy

- ustálené proudění: *hvězdný vítr*
 - koronální hvězdný vítr
 - hvězdný vítr urychlovaný absorpcí záření na prachových částicích
 - hvězdný vítr urychlovaný absorpcí záření v čarách

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

ztráta hmoty *samostatné* hvězdy

- ustálené proudění: *hvězdný vítr*
 - koronální hvězdný vítr
 - hvězdný vítr urychlovaný absorpcí záření na prachových částicích
 - hvězdný vítr urychlovaný absorpcí záření v čarách
- explozivní procesy
 - výbuch supernovy
 - vzplanutí "nepravé" supernovy

Má Slunce sluneční vítr?

- dva druhy ohonů komet (Biermann 1951)



Má Slunce sluneční vítr?

- polární záře



Má Slunce sluneční vítr?

- družicová pozorování
 - proud částic od Slunce (protony, elektrony, jádra He, ...)

Má Slunce sluneční vítr?

- družicová pozorování
 - proud částic od Slunce (protony, elektrony, jádra He, ...)
 - rychlost $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$
 - koncentrace ($r = 1 \text{ AU}$) $\sim 10^7 \text{ částic m}^{-3}$

Má Slunce sluneční vítr?

- družicová pozorování
 - proud částic od Slunce (protony, elektrony, jádra He, ...)
 - rychlost $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$
 - koncentrace ($r = 1 \text{ AU}$) $\sim 10^7 \text{ částic m}^{-3}$
 - rychlost ztráty hmoty

$$\dot{M} = 4\pi r^2 \rho v \approx 2 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$$

Co urychluje sluneční vítr?

- střední kvadratická rychlost částic ideálního plynu

$$v_{sk} = \sqrt{\frac{3kT}{m_H}}$$

- T je teplota
- m_H je hmotnost částic (vodíku)

Co urychluje sluneční vítr?

- střední kvadratická rychlost částic ideálního plynu

$$v_{\text{sk}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{H}}}}$$

- pro $v_{\text{sk}} \approx v_{\text{únik}}$ by částice mohly unikat z povrchu Slunce pouze v důsledku svého tepelného pohybu

Co urychluje sluneční vítr?

- střední kvadratická rychlost částic ideálního plynu

$$v_{\text{sk}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{H}}}}$$

- typická teplota povrchových vrstev Slunce je 6000 K

Co urychluje sluneční vítr?

- střední kvadratická rychlost částic ideálního plynu

$$v_{\text{sk}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{H}}}}$$

- typická teplota povrchových vrstev Slunce je 6000 K
- tomu odpovídá $v_{\text{sk}} = 12 \text{ km s}^{-1} \ll v_{\text{únik}}$

Úplné zatmění Slunce



Total Solar Eclipse 2008

© 2008 Miloslav Druckmüller, Peter Aniol, Martin Dietzel, Vojtech Rušin

Úplné zatmění Slunce

- Slunce má rozsáhlou a řídkou obálku: *koróna*
- koróna je v optickém oboru pozorovatelná pouze při úplném zatmění nebo pomocí sond

Úplné zatmění Slunce

- Slunce má rozsáhlou a řídkou obálku: *koróna*
- koróna je v optickém oboru pozorovatelná pouze při úplném zatmění nebo pomocí sond
- teplota koróny je řádově $10^5 - 10^6$ K

Úplné zatmění Slunce

- Slunce má rozsáhlou a řídkou obálku: *koróna*
- koróna je v optickém oboru pozorovatelná pouze při úplném zatmění nebo pomocí sond
- teplota koróny je řádově $10^5 - 10^6$ K
- odpovídající střední kvadratická rychlost je řádově 100 km s^{-1}

Úplné zatmění Slunce

- Slunce má rozsáhlou a řídkou obálku: *koróna*
 - koróna je v optickém oboru pozorovatelná pouze při úplném zatmění nebo pomocí sond
 - teplota koróny je řádově $10^5 - 10^6$ K
 - odpovídající střední kvadratická rychlost je řádově 100 km s^{-1}
- ⇒ rozpínání koróny je příčinou slunečního větru (Parker 1958)
- ⇒ *koronální hvězdný vítr*

Úplné zatmění Slunce

- Slunce má rozsáhlou a řídkou obálku: *koróna*
 - koróna je v optickém oboru pozorovatelná pouze při úplném zatmění nebo pomocí sond
 - teplota koróny je řádově $10^5 - 10^6$ K
 - odpovídající střední kvadratická rychlost je řádově 100 km s^{-1}
- ⇒ rozpínání koróny je příčinou slunečního větru (Parker 1958)
- ohřev koróny v důsledku disipace magnetohydrodynamických vln (?)

Je sluneční vítr důležitý?

- Slunce bude hvězdou hlavní posloupnosti
~ 11×10^9 let

Je sluneční vítr důležitý?

- Slunce bude hvězdou hlavní posloupnosti
 $\sim 11 \times 10^9$ let
- Slunce ztrácí hvězdným větrem
 $2 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$

Je sluneční vítr důležitý?

- Slunce bude hvězdou hlavní posloupnosti
 $\sim 11 \times 10^9$ let
 - Slunce ztrácí hvězdným větrem
 $2 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
 - za celou dobu pobytu na hlavní posloupnosti
ztratí $\sim 10^{-4} M_{\odot}$
- ⇒ příliš malé množství na ovlivnění slunečního vývoje

Brzdění rotace Slunce

- Slunce má magnetické pole

Brzdění rotace Slunce

- Slunce má magnetické pole
- sluneční vítr je ionizovaný

Brzdění rotace Slunce

- Slunce má magnetické pole
 - sluneční vítr je ionizovaný
- ⇒ sluneční vítr se pohybuje podél siločar magnetického pole

Brzdění rotace Slunce

- Slunce má magnetické pole
 - sluneční vítr je ionizovaný
- ⇒ sluneční vítr se pohybuje podél siločar magnetického pole
- magnetické pole až do poloměru $r_A \approx 15 R_\odot$ rotuje jako tuhé těleso se stejnou úhlovou rychlostí jako povrchové vrstvy Slunce

Brzdění rotace Slunce

- Slunce má magnetické pole
 - sluneční vítr je ionizovaný
- ⇒ sluneční vítr se pohybuje podél siločar magnetického pole
- magnetické pole až do poloměru $r_A \approx 15 R_\odot$ rotuje jako tuhé těleso se stejnou úhlovou rychlostí jako povrchové vrstvy Slunce
- ⇒ Slunce prostřednictvím větru ztrácí moment hybnosti, jeho rotace se zpomaluje (Weber a Davis 1967)

Zpomalování rotace Slunce

- velikost momentu hybnosti Slunce

$$L = \eta M_{\odot} R_{\odot}^2 \Omega$$

- Ω je velikost úhlové rychlosti
- $\eta \approx 0,1$

Zpomalování rotace Slunce

- velikost momentu hybnosti Slunce

$$L = \eta M_{\odot} R_{\odot}^2 \Omega$$

- velikost ztráty momentu větrem

$$\dot{L} = \frac{2}{3} \dot{M} r_A^2 \Omega$$

Zpomalování rotace Slunce

- velikost momentu hybnosti Slunce

$$L = \eta M_{\odot} R_{\odot}^2 \Omega$$

- velikost ztráty momentu větrem

$$\dot{L} = \frac{2}{3} \dot{M} r_A^2 \Omega = \eta M_{\odot} R_{\odot}^2 \dot{\Omega}$$

Zpomalování rotace Slunce

- velikost momentu hybnosti Slunce

$$L = \eta M_{\odot} R_{\odot}^2 \Omega$$

- velikost ztráty momentu větrem

$$\dot{L} = \frac{2}{3} \dot{M} r_A^2 \Omega = \eta M_{\odot} R_{\odot}^2 \dot{\Omega}$$

- charakteristická časová škála změny periody

$$\tau_L = \frac{\Omega}{\dot{\Omega}} = \frac{3}{2} \eta \frac{M_{\odot} R_{\odot}^2}{\dot{M} r_A^2}$$

Zpomalování rotace Slunce

- pro současné parametry Slunce $\tau_L \approx 10^{10}$ let

Zpomalování rotace Slunce

- pro současné parametry Slunce $\tau_L \approx 10^{10}$ let
- τ_L srovnatelné se stářím Slunce

Zpomalování rotace Slunce

- pro současné parametry Slunce $\tau_L \approx 10^{10}$ let
 - τ_L srovnatelné se stářím Slunce
- ⇒ sluneční vítr podstatně zbrzdil rotaci Slunce

Zpomalování rotace Slunce

- pro současné parametry Slunce $\tau_L \approx 10^{10}$ let
- τ_L srovnatelné se stářím Slunce
- ⇒ sluneční vítr podstatně zbrzdil rotaci Slunce
- hvězdy podobné Slunci mají stejný typ hvězdného větru

Vítr svítivých chladných hvězd

- chladné svítivé hvězdy ($L = 10^4 - 10^6 L_{\odot}$) mají také hvězdné větry



mlhovina v okolí Miry (o Cet)

Vítr svítivých chladných hvězd

- chladné svítivé hvězdy ($L = 10^4 - 10^6 L_{\odot}$) mají také hvězdné větry
- koronální hvězdný vítr?

Vítr svítivých chladných hvězd

- chladné svítivé hvězdy ($L = 10^4 - 10^6 L_{\odot}$) mají také hvězdné větry
- koronální hvězdný vítr?
- pozorování tomu nenasvědčují

Zářivá síla?

- hvězdy mají vysoký zářivý výkon

Zářivá síla?

- hvězdy mají vysoký zářivý výkon
- fotony mají energii $E_\nu = h\nu$, ale také hybnost

$$p_\nu = \frac{E_\nu}{c}$$

Zářivá síla?

- hvězdy mají vysoký zářivý výkon
- fotony mají energii $E_\nu = h\nu$, ale také hybnost
- urychlování látky v důsledku absorpce záření?

Zářivá síla?

- hvězdy mají vysoký zářivý výkon
- fotony mají energii $E_\nu = h\nu$, ale také hybnost
- urychlování látky v důsledku absorpce záření?
- zářivá síla v důsledku absorpce záření na prachových částicích schopna urychlit vítr

Zářivá síla?

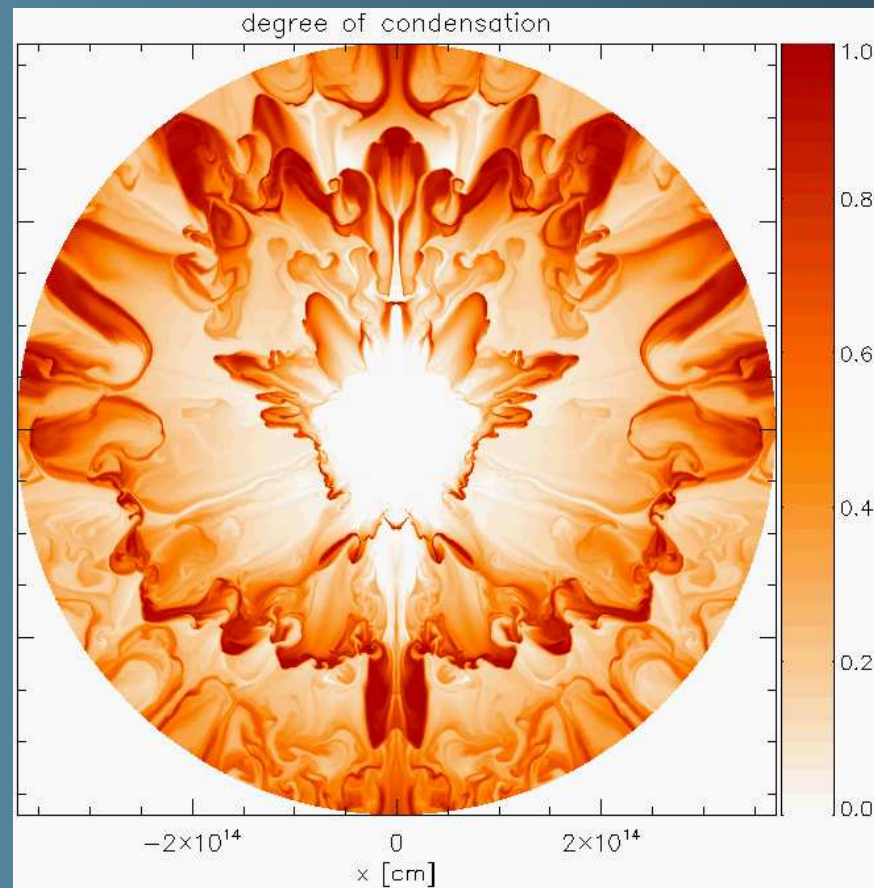
- hvězdy mají vysoký zářivý výkon
- fotony mají energii $E_\nu = h\nu$, ale také hybnost
- urychlování látky v důsledku absorpce záření?
- zářivá síla v důsledku absorpce záření na prachových částicích schopna urychlit vítr
- problém: hvězdy příliš horké, na povrchu nedochází k tvorbě prachových částic

Zářivá síla?

- hvězdy mají vysoký zářivý výkon
- fotony mají energii $E_\nu = h\nu$, ale také hybnost
- urychlování látky v důsledku absorpce záření?
- zářivá síla v důsledku absorpce záření na prachových částicích schopna urychlit vítr
- problém: hvězdy příliš horké, na povrchu nedochází k tvorbě prachových částic
- řešení: hvězdné pulzace

Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*



(Woitke 2005)

Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*

- typická rychlost ztráty hmoty $10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$

Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*

- typická rychlost ztráty hmoty $10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
- doba trvání odpovídající fáze hvězdného vývoje $\sim 10^5$ let

Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*

- typická rychlost ztráty hmoty $10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
- doba trvání odpovídající fáze hvězdného vývoje $\sim 10^5$ let

⇒ hvězdy mohou ztratit podstatnou část své hmotnosti prachem urychlovaným větrem

Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*

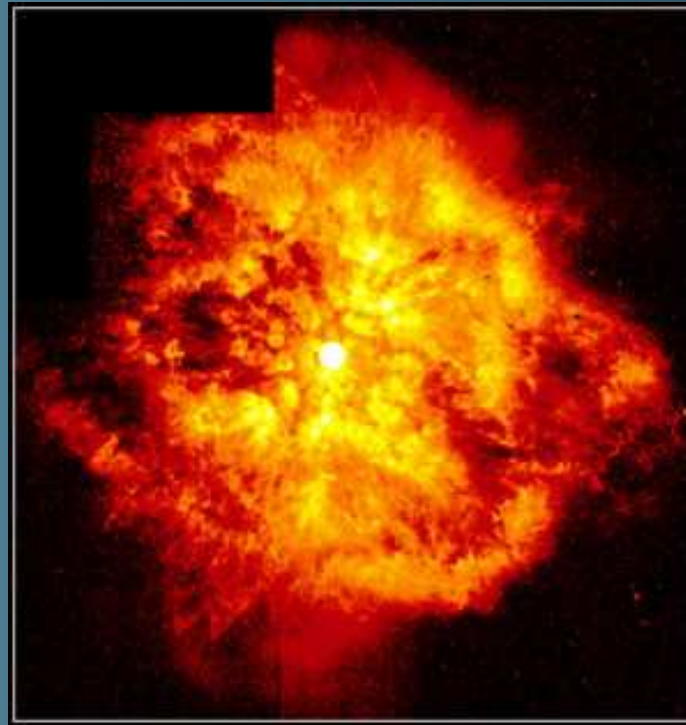
- typická rychlost ztráty hmoty $10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
- doba trvání odpovídající fáze hvězdného vývoje $\sim 10^5$ let

⇒ hvězdy mohou ztratit podstatnou část své hmotnosti prachem urychlovaným větrem

- Slunce v budoucnu ztratí tímto způsobem zhruba polovinu své hmoty

Hvězdný vítr horkých hvězd

- horké hvězdy mají hvězdné větry



mlhovina v blízkosti hvězdy WR 124

Hvězdný vítr horkých hvězd

- horké hvězdy mají hvězdné větry
- horké hvězdy nemají koróny \Rightarrow nemají koronální vítr

Hvězdný vítr horkých hvězd

- horké hvězdy mají hvězdné větry
- horké hvězdy nemají koróny \Rightarrow nemají koronální vítr
- horké hvězdy jsou zářivé: zářivá síla urychluje vítr?

Hvězdný vítr horkých hvězd

- horké hvězdy mají hvězdné větry
- horké hvězdy nemají koróny \Rightarrow nemají koronální vítr
- horké hvězdy jsou zářivé: zářivá síla urychluje vítr?
 - zářivá síla v důsledku absorpce záření na prachových částicích – prachové částice by se vypařily

Hvězdný vítr horkých hvězd

- horké hvězdy mají hvězdné větry
- horké hvězdy nemají koróny \Rightarrow nemají koronální vítr
- horké hvězdy jsou zářivé: zářivá síla urychluje vítr?
 - zářivá síla v důsledku absorpce záření na prachových částicích – prachové částice by se vypařily
 - zářivá síla v důsledku absorpce v čarách těžších prvků?

Spektrální čáry

- atomy a ionty ve vázaných stavech mohou mít pouze určité hodnoty energie (kvantová fyzika)

Spektrální čáry

- atomy a ionty ve vázaných stavech mohou mít pouze určité hodnoty energie (kvantová fyzika)
- při přechodu mezi jednotlivými vázanými stavy jsou absorbovány nebo emitovány pouze fotony s určitou vlnovou délkou

Spektrální čáry

- atomy a ionty ve vázaných stavech mohou mít pouze určité hodnoty energie (kvantová fyzika)
- při přechodu mezi jednotlivými vázanými stavy jsou absorbovány nebo emitovány pouze fotony s určitou vlnovou délkou
- ve spektru pozorujeme *spektrální čáry*

Spektrální čáry

- atomy a ionty ve vázaných stavech mohou mít pouze určité hodnoty energie (kvantová fyzika)
- při přechodu mezi jednotlivými vázanými stavy jsou absorbovány nebo emitovány pouze fotony s určitou vlnovou délkou
- ve spektru pozorujeme *spektrální čáry*
- při absorpci foton předává svoji hybnost atomu (iontu)

Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- zářivá síla v důsledku absorpce záření v čarách těžších prvků (Fe, C, N, O, ...) schopna urychlit hvězdný vítr horkých hvězd (Lucy a Solomon 1970, Castor, Abbott a Klein 1975)

Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- rychlost ztráty hmoty v důsledku absorpce záření v jedné výrazné čáře (L je zářivý výkon hvězdy)

$$\dot{M} \approx \frac{L}{c^2}$$

Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- rychlost ztráty hmoty v důsledku absorpce záření v jedné výrazné čáře (L je zářivý výkon hvězdy)

$$\dot{M} \approx \frac{L}{c^2}$$

- rychlost ztráty hmoty až $10^{-6} - 10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$

Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- rychlost ztráty hmoty v důsledku absorpce záření v jedné výrazné čáře (L je zářivý výkon hvězdy)

$$\dot{M} \approx \frac{L}{c^2}$$

- rychlost ztráty hmoty až $10^{-6} - 10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
- rychlost větru až řádově 10^3 km s^{-1}

Je vítr horkých hvězd důležitý?

- horké hvězdy mají hmotnost $\sim 10 M_{\odot}$
 - doba života horkých hvězd $\sim 10^6$ let
 - ztrácí hvězdným větrem $\sim 10^{-6} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
 - horké hvězdy ztrácí hvězdným větrem podstatnou část své hmoty
- ⇒ hvězdný vítr zásadně ovlivňuje vývoj horkých hvězd

Supernovy (typu II, Ib, Ic)

- konečná fáze vývoje hvězdy s počáteční hmotností $M_0 \gtrsim 11 M_{\odot}$

Supernovy (typu II, Ib, Ic)

- konečná fáze vývoje hvězdy s počáteční hmotností $M_0 \gtrsim 11 M_{\odot}$
- na konci vývoje: železné jádro

Supernovy (typu II, Ib, Ic)

- konečná fáze vývoje hvězdy s počáteční hmotností $M_0 \gtrsim 11 M_{\odot}$
- na konci vývoje: železné jádro
- zhroucení železného jádra

Supernovy (typu II, Ib, Ic)

- konečná fáze vývoje hvězdy s počáteční hmotností $M_0 \gtrsim 11 M_{\odot}$
- na konci vývoje: železné jádro
- zhroucení železného jádra
- vznik velkého množství neutrin

Supernovy (typu II, Ib, Ic)

- konečná fáze vývoje hvězdy s počáteční hmotností $M_0 \gtrsim 11 M_{\odot}$
- na konci vývoje: železné jádro
- zhroucení železného jádra
- vznik velkého množství neutrin
- část se zachytí v kolabující obálce

Supernovy (typu II, Ib, Ic)

- konečná fáze vývoje hvězdy s počáteční hmotností $M_0 \gtrsim 11 M_{\odot}$
 - na konci vývoje: železné jádro
 - zhroucení železného jádra
 - vznik velkého množství neutrin
 - část se zachytí v kolabující obálce
- ⇒ exploze, zjasnění hvězdy

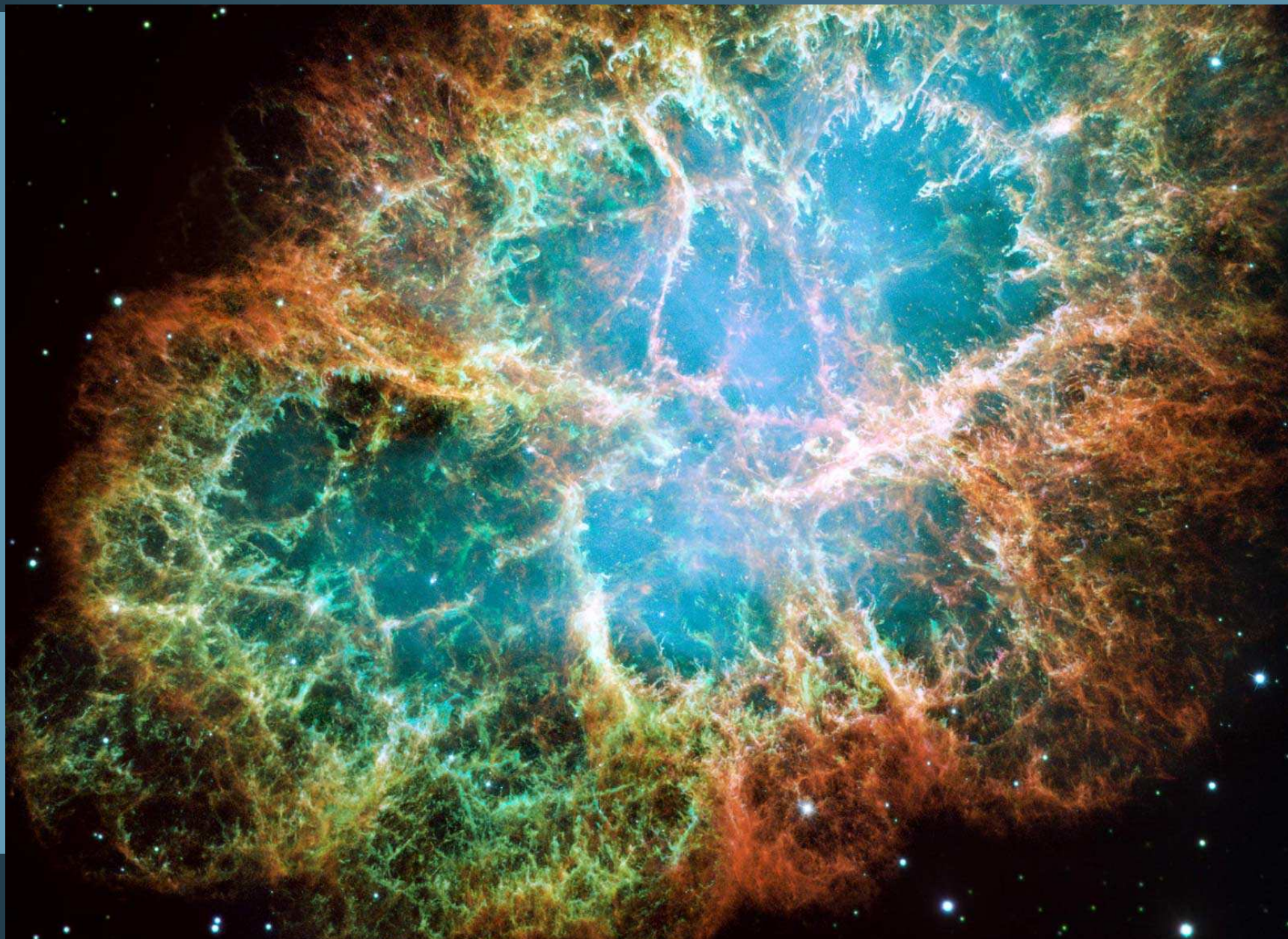
Supernovy (typu II, Ib, Ic)



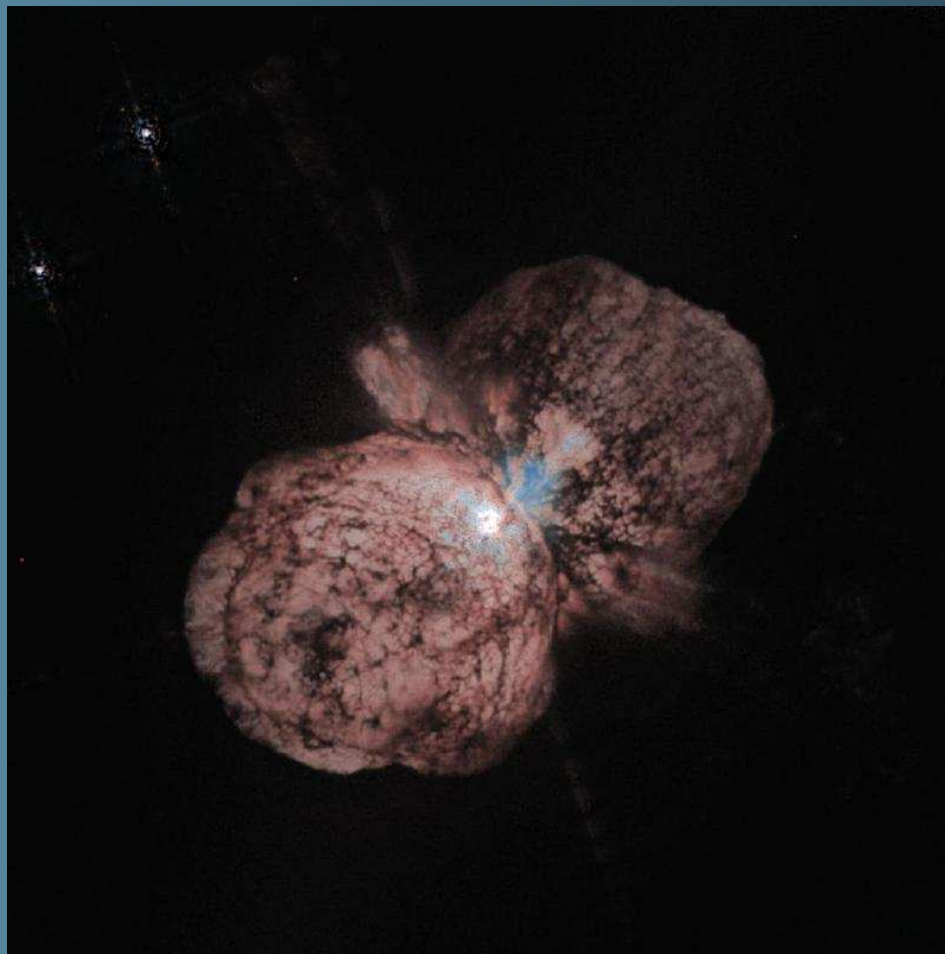
Supernovy (typu II, Ib, Ic)

- konečná fáze vývoje hvězdy s počáteční hmotností $M_0 \gtrsim 11 M_{\odot}$
 - na konci vývoje: železné jádro
 - zhroucení železného jádra
 - vznik velkého množství neutrin
 - část se zachytí v kolabující obálce
- ⇒ exploze, zjasnění hvězdy
- odvržení obalu do mezihvězdného prostředí

Supernovy (typu II, Ib, Ic)



”Nepravé” supernovy



η Car (HST)

”Nepravé” supernovy

- hvězda η Car na počátku 19. století ztratila v průběhu několika let $\approx 10 M_{\odot}$ látky

”Nepravé” supernovy

- hvězda η Car na počátku 19. století ztratila v průběhu několika let $\approx 10 M_{\odot}$ látky
- připomíná supernovu, ale supernovou není: ”nepravá” supernova

”Nepravé” supernovy

- hvězda η Car na počátku 19. století ztratila v průběhu několika let $\approx 10 M_{\odot}$ látky
- připomíná supernovu, ale supernovou není: ”nepravá” supernova
- příčina výbuchu nejasná

Význam hvězdných větrů

- hvězdy mohou během svého vývoje ztratit i více než 90% své hmotnosti

Význam hvězdných větrů

- hvězdy mohou během svého vývoje ztratit i více než 90% své hmotnosti
- důležité zejména
 - prachem urychlovaný hvězdný vítr
 - čarami urychlovaný hvězdný vítr
 - exploze supernov

