

Hvězdný vítr

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

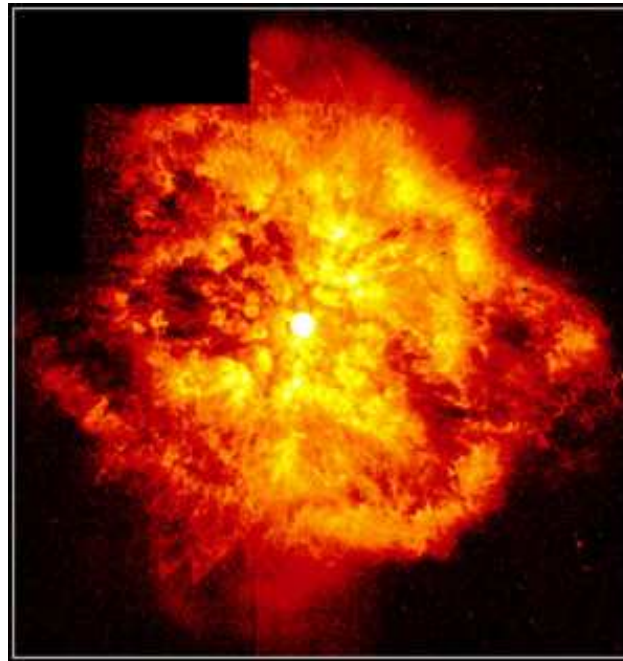
- obálky v okolí hvězd



mlhovina Abell 39

Svědectví o změně hmotnosti

- obálky v okolí hvězd



mlhovina v blízkosti hvězdy WR 124

Svědectví o změně hmotnosti

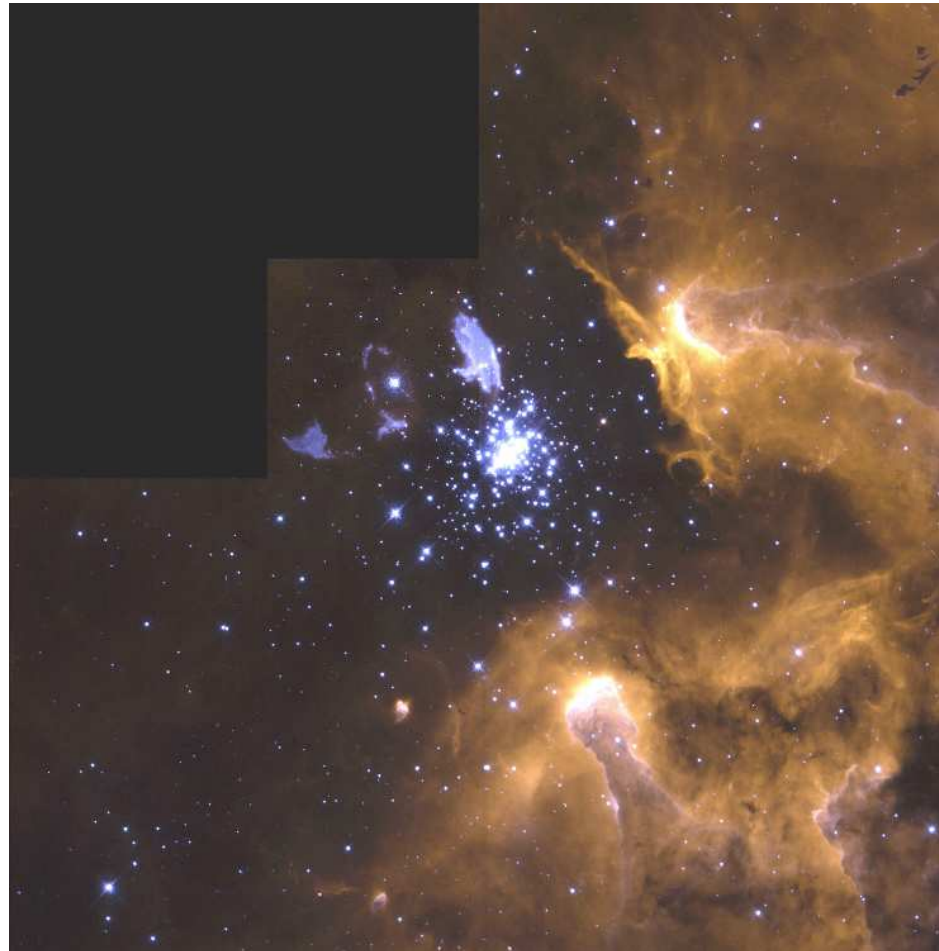
- obálky v okolí hvězd



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 termionukleárních 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

- sféricky symetrický odtok látky
- pohybová rovnice

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = \rho g_v - \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{\rho G M}{r^2}$$

- ρ je hustota
- v je radiální rychlost
- p je tlak
- ρg_v je působící síla

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy

- sféricky symetrický odtok látky
- stacionární odtok

$$v \frac{dv}{dr} = g_v - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} - \frac{GM}{r^2}$$

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy

- sféricky symetrický odtok látky
- izotermický odtok, $p = a^2 \rho$

$$v \frac{dv}{dr} = g_v - \frac{a^2}{\rho} \frac{d\rho}{dr} - \frac{GM}{r^2}$$

- a je izotermická rychlost zvuku

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy

- sféricky symetrický odtok látky
- integrace od povrchu hvězdy R_* do nekonečna

$$\int_{R_*}^{\infty} v \frac{dv}{dr} dr = \int_{R_*}^{\infty} g_v dr - \int_{R_*}^{\infty} \frac{a^2}{\rho} \frac{d\rho}{dr} dr - \int_{R_*}^{\infty} \frac{GM}{r^2} dr$$

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy

- sféricky symetrický odtok látky
- integrace od povrchu hvězdy R_* do nekonečna

$$\frac{1}{2}v_\infty^2 - \frac{1}{2}v_0^2 = \int_{R_*}^{\infty} g_v dr - a^2 \ln \frac{\rho_\infty}{\rho_0} - \frac{GM}{R_*}$$

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy

- sféricky symetrický odtok látky
- integrace od povrchu hvězdy R_* do nekonečna

$$\frac{1}{2}v_{\infty}^2 - \frac{1}{2}v_0^2 = \int_{R_*}^{\infty} g_v dr - \frac{GM}{R_*}$$

- typicky práce tlakových sil zanedbatelná

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy

- sféricky symetrický odtok látky
- integrace od povrchu hvězdy R_* do nekonečna

$$\frac{1}{2}v_\infty^2 - \frac{1}{2}v_0^2 = \int_{R_*}^{\infty} g_v dr - \frac{GM}{R_*}$$

- dvě možnosti:
 - působící síla dostatečně velká

$$\int_{R_*}^{\infty} g_v dr \geq \frac{GM}{R_*}$$

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy

- sféricky symetrický odtok látky
- integrace od povrchu hvězdy R_* do nekonečna

$$\frac{1}{2}v_{\infty}^2 - \frac{1}{2}v_0^2 = \int_{R_*}^{\infty} g_v dr - \frac{GM}{R_*}$$

- dvě možnosti:
 - působící síla dostatečně velká
 - dostatečně vysoká počáteční rychlost

$$\frac{1}{2}v_0^2 \geq \frac{GM}{R_*}$$

- podmínka pro energii: $E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} \geq 0$

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy

- sféricky symetrický odtok látky
- integrace od povrchu hvězdy R_* do nekonečna

$$\frac{1}{2}v_{\infty}^2 - \frac{1}{2}v_0^2 = \int_{R_*}^{\infty} g_v dr - \frac{GM}{R_*}$$

- dvě možnosti:
 - působící síla dostatečně velká
 - dostatečně vysoká počáteční rychlost

$$v_0 \geq v_{\text{únik}} = \sqrt{\frac{2GM}{R_*}}$$

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

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy

- rychlost 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:

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



Ilokomotiva 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