

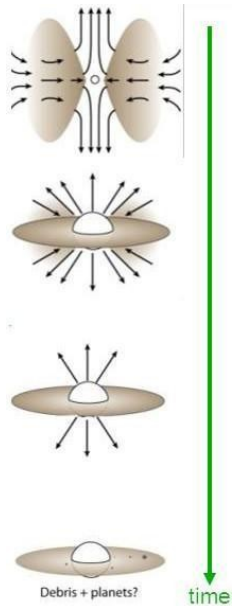
Zrodila se hvězda

Soňa Ehlerová

Astronomický ústav AV ČR

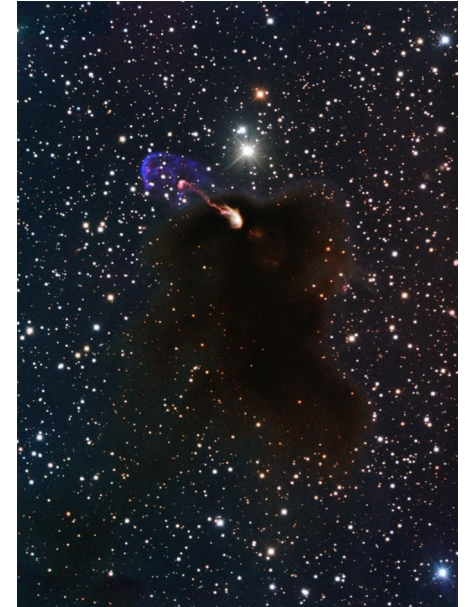
26.10.2021, přednáška v rámci U3V “Astronomie aneb Jak žijí hvězdy”, Masarykova univerzity, Brno.

Zrodila se hvězda



Soňa Ehlerová

Astronomický ústav AV ČR



26.10.2021, přednáška v rámci U3V “Astronomie aneb Jak žijí hvězdy”, Masarykova univerzity, Brno.

Obsah

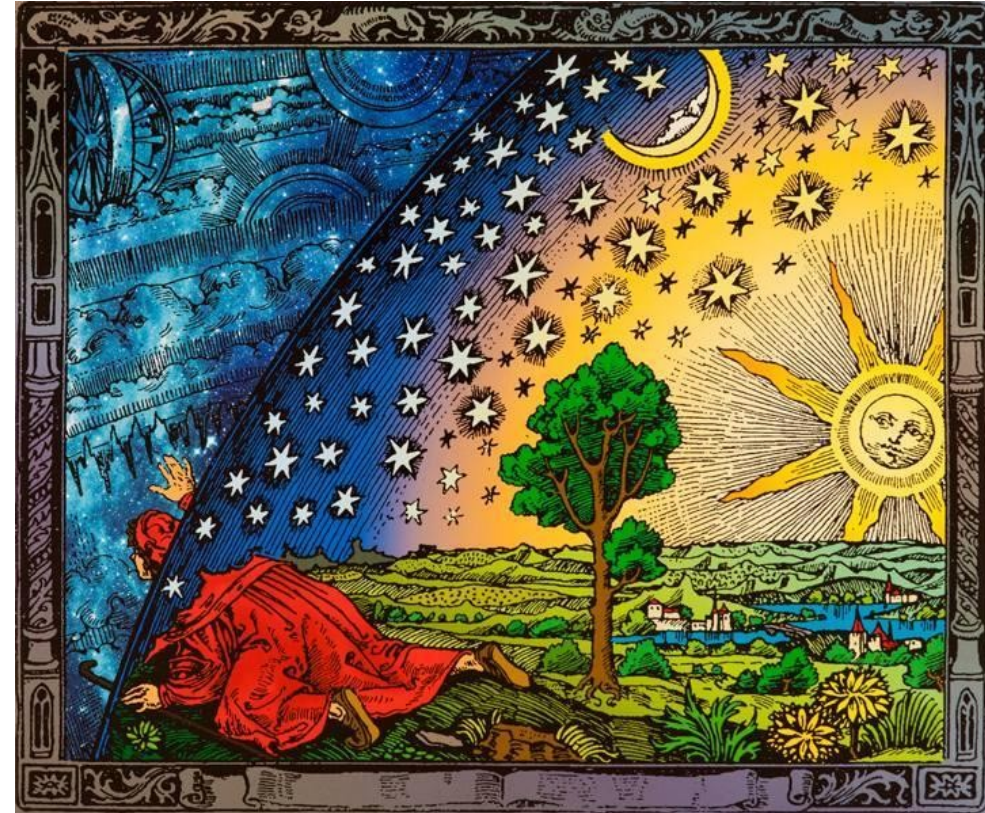
- 1) Jeansova nestabilita
- 2) Mezihvězdné prostředí
- 3) Gravitační kolaps
- 4) Mladé hvězdné objekty
- 5) HR diagram
- 6) Pozorování

Názory na tvorbu hvězd v minulosti (mytologii)

- stvoření hvězd
- neměnný vesmír, sféra stálic

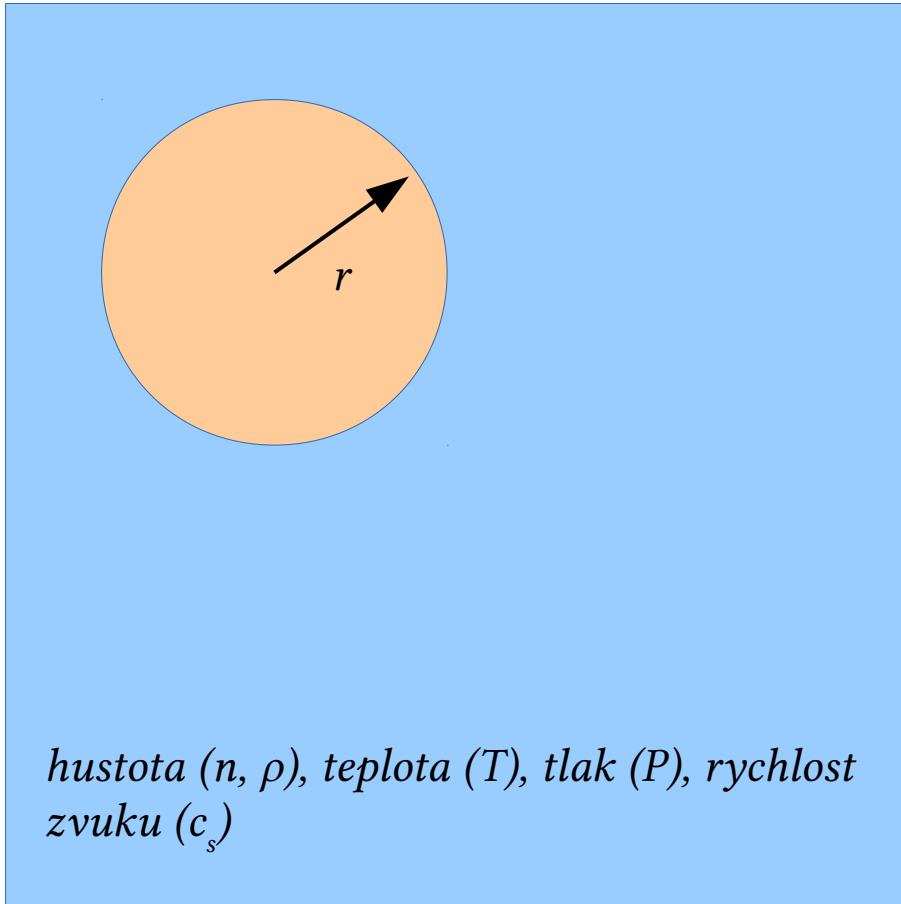


ע אַלמאָרן פֿאַר אַלע
אַלע אַלע אַלע אַלע
אַלע אַלע אַלע אַלע
אַלע אַלע אַלע אַלע
אַלע אַלע אַלע אַלע
אַלע אַלע אַלע אַלע
אַלע אַלע אַלע אַלע
אַלע אַלע אַלע אַלע



> 1600 dynamický vesmír

Jeansova nestabilita



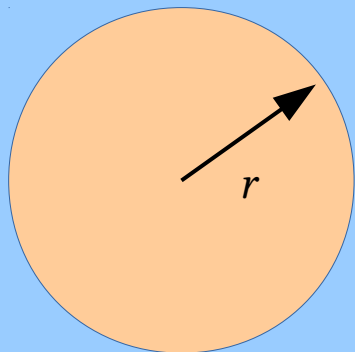
gravitace vs termodynamika

- gravitace: volný pád do centra
(t_{ff})

- náhodné (tepelné) pohyby:
($t_{\text{sound}} = r/c_{\text{sound}}$)

$t_{\text{ff}} < t_{\text{sound}} \longrightarrow$ gravitace vítězí

Jeansova nestabilita



hustota (n, ρ), teplota (T), tlak (P), rychlost zvuku (c_s)

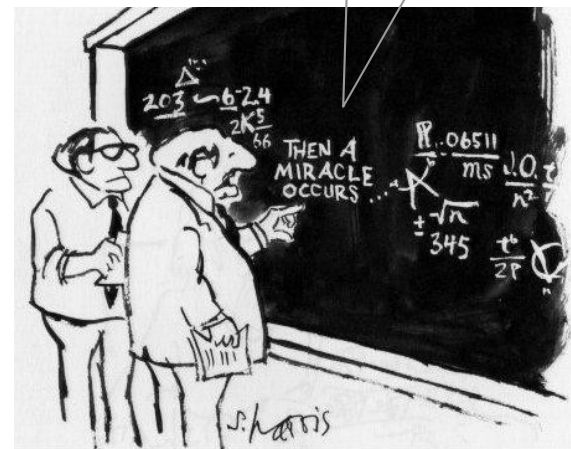
gravitace

volný pád do centra

A potom se stane zázrak ...

$$\begin{aligned} t_{ff} &\sim t_{orbit} \\ t_{orbit} &= \frac{2\pi r}{v_{orbit}} \\ F_{odst} &= F_{grav} \\ \frac{mv_{orbit}^2}{r} &= \frac{GmM}{r^2} \\ \frac{4\pi^2 r^2}{t_{orbit}^2} \cdot \frac{1}{r} &= \frac{G}{r^2} \cdot \frac{4\pi\rho r^3}{3} \end{aligned}$$

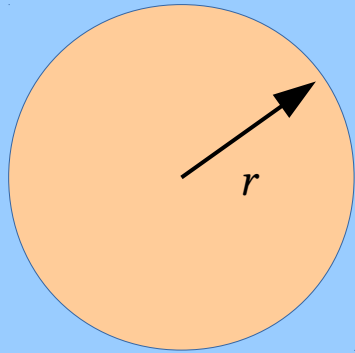
$$\begin{aligned} t_{orbit} &= \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} \\ t_{ff} &\sim (G\rho)^{-1/2} \end{aligned}$$



"I think you should be more explicit here in step two."

"Myslím, že byste měl být trochu konkrétnější v kroku dva."

Jeansova nestabilita



*hustota (n, ρ), teplota (T), tlak (P), rychlost
zvuku (c_s)*

termodynamika

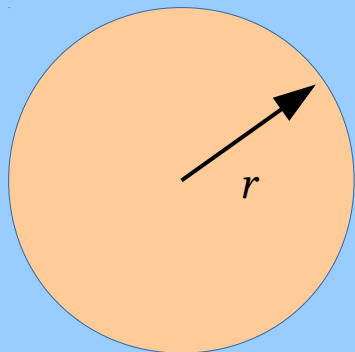
náhodné (tepelné) pohyby:

$$t_{sound} = \frac{r}{c_s}$$
$$c_s \simeq \sqrt{\frac{P}{\rho}}$$

Gravitace vítězí, když

$$t_{ff} < t_{sound}$$
$$(G\rho)^{-1/2} < \frac{r}{c_s}$$

Jeansova nestabilita



*hustota (n, ρ), teplota (T), tlak (P), rychlost
zvuku (c_s)*

Nestability mohou růst, když

$$r > r_{jeans} = \left(\frac{15k_b^3}{4\pi G\mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{T}{n} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$M > M_{jeans} = \left(\frac{375k_B^3}{4\pi\mu^4 G^3} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{T^3}{n} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(Jeansova délka, hmotnost)

$$r_{jeans} = 0.4 \text{ pc} \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$M_{jeans} = 100 M_{\odot} \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

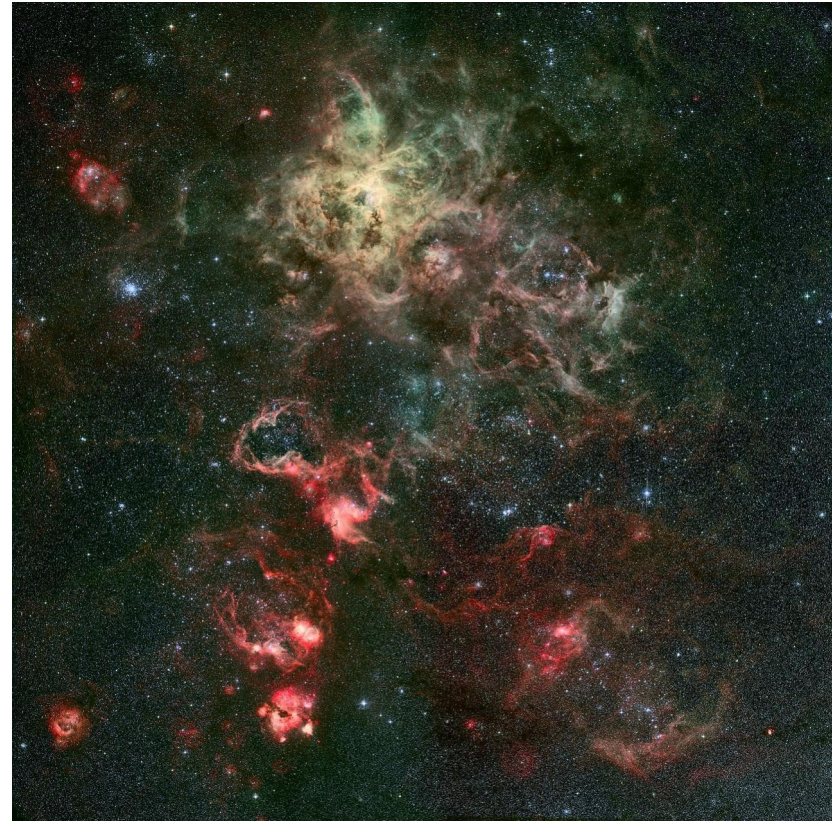
Mezihvězdné prostředí (ISM)

Mlhoviny

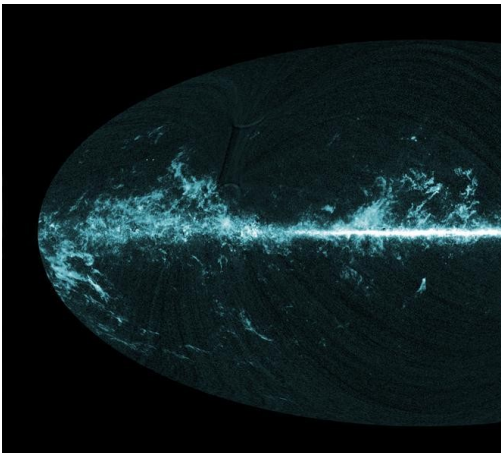
Pozorování od 1904 (J. Hartmann)

Prach

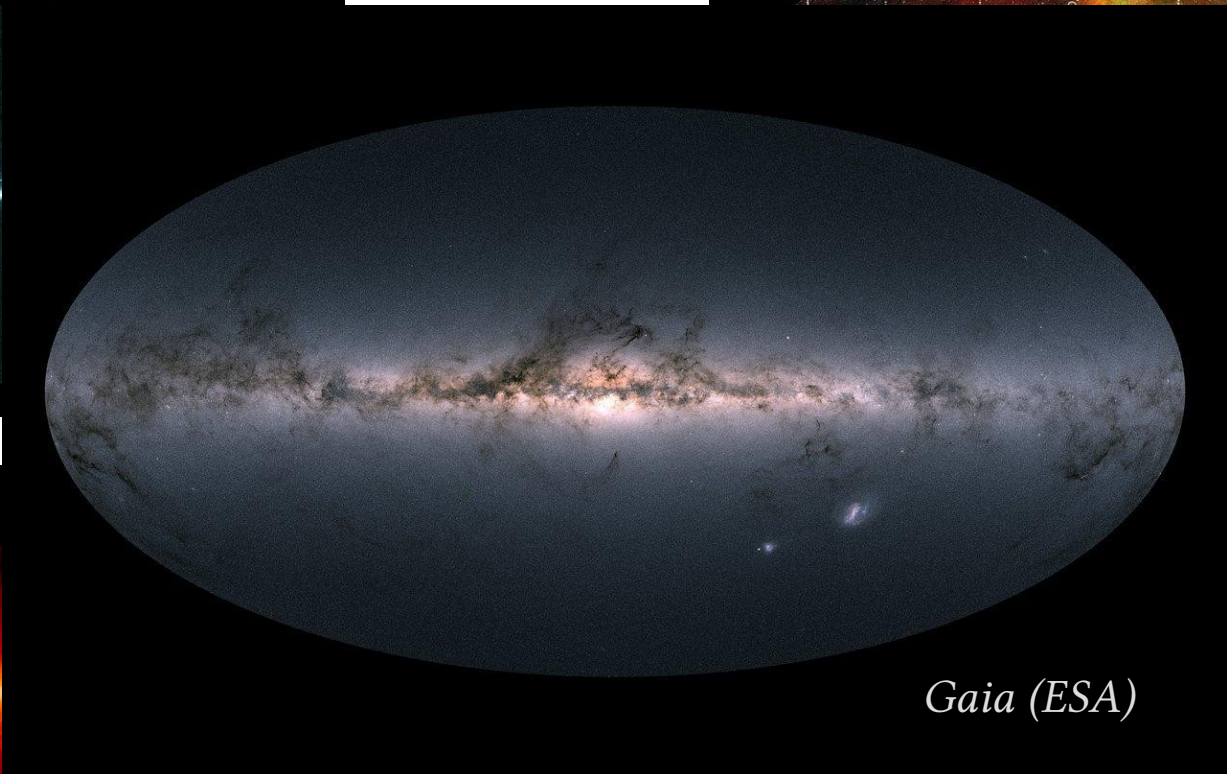
Rozvoj pozorování ISM
po druhé světové válce



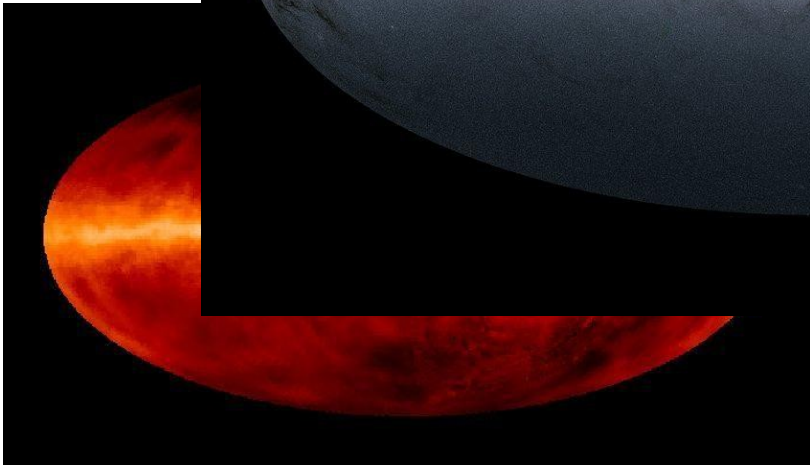
Mezihvězdné prostředí (ISM)



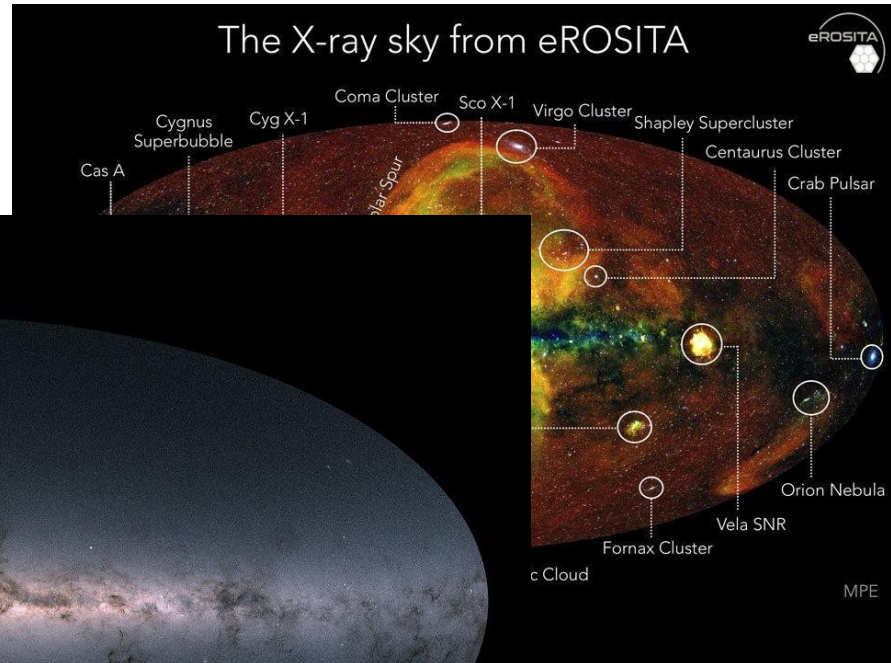
Planck (ESA)



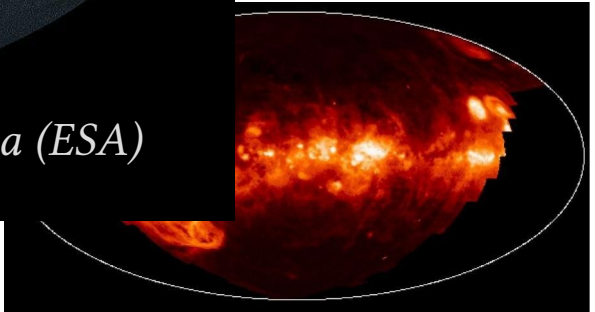
Gaia (ESA)



HI4PI

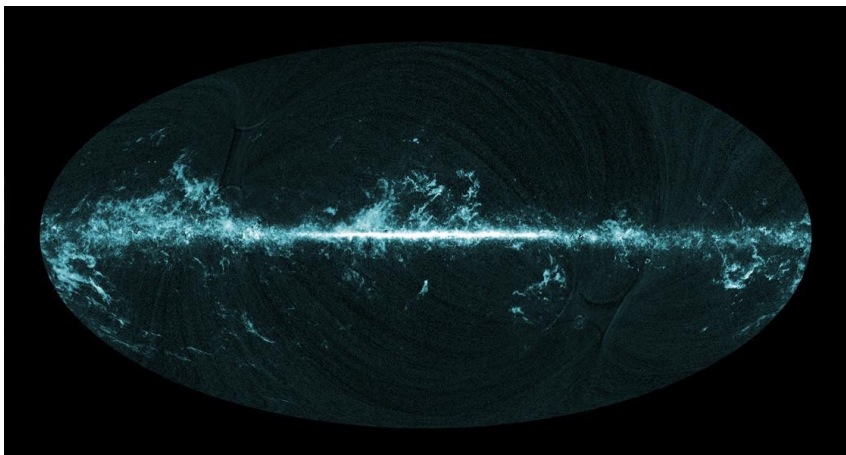


The X-ray sky from eROSITA

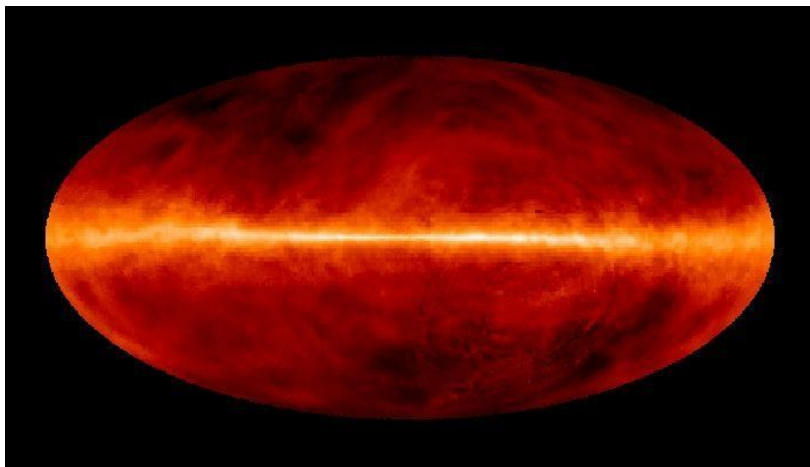


WHAM

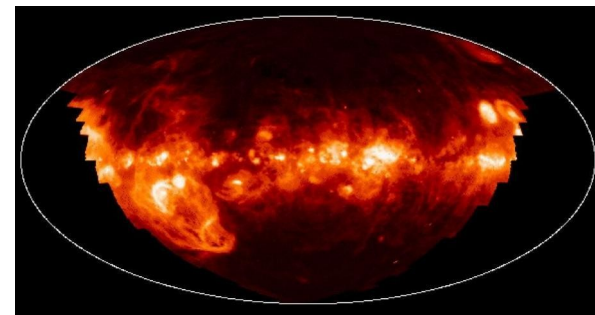
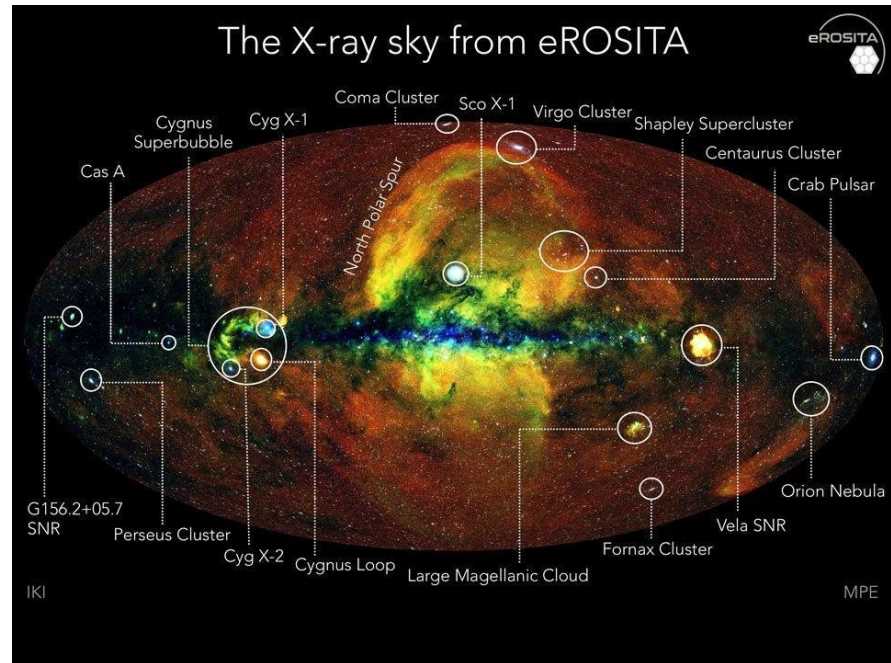
Mezihvězdné prostředí (ISM)



Planck (ESA)

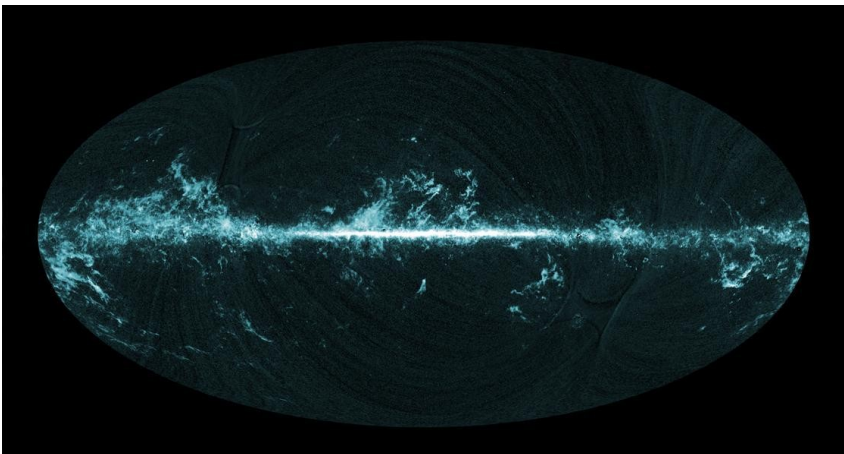


HI4PI

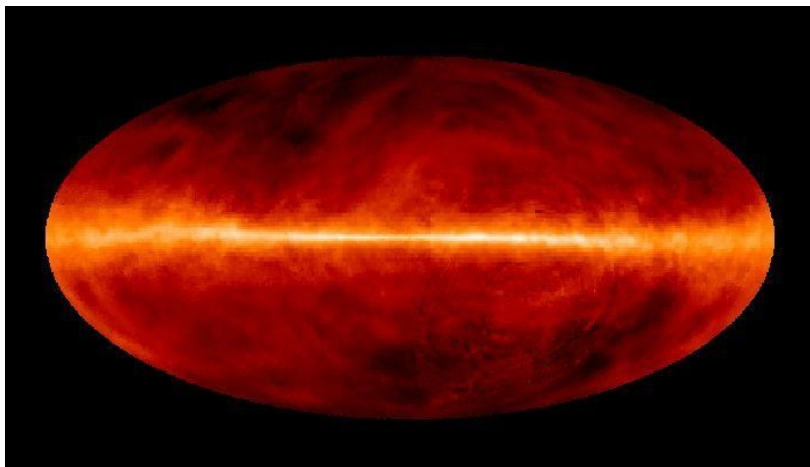


WHAM

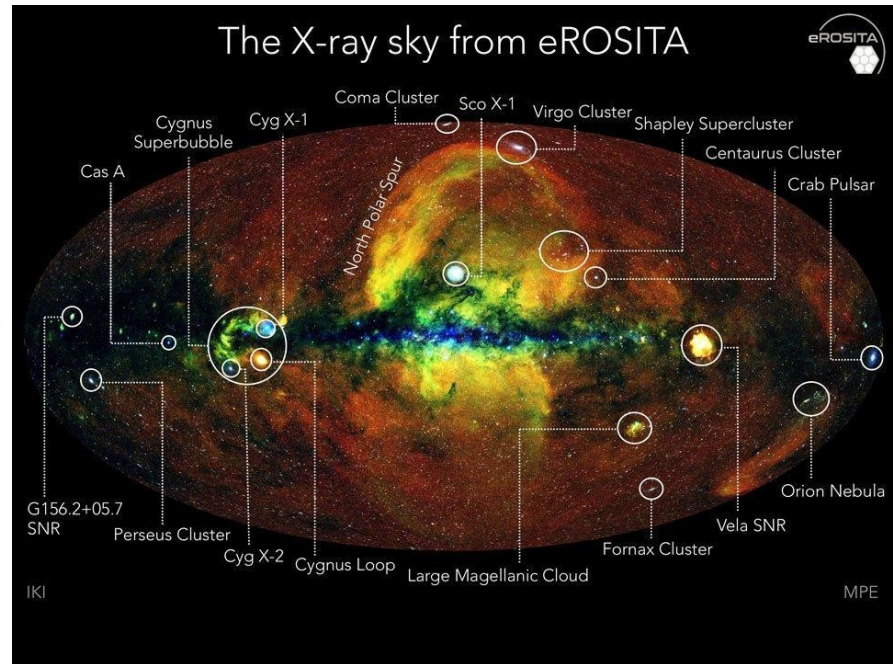
Mezihvězdné prostředí (ISM)



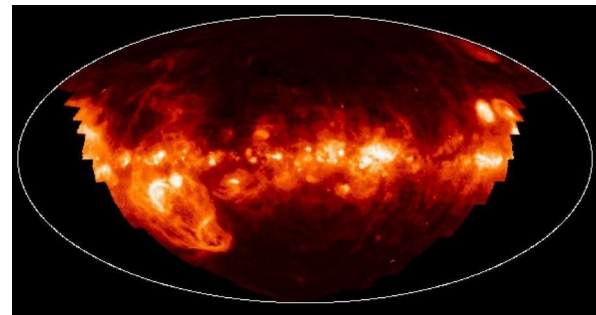
Planck (ESA)



HI4PI

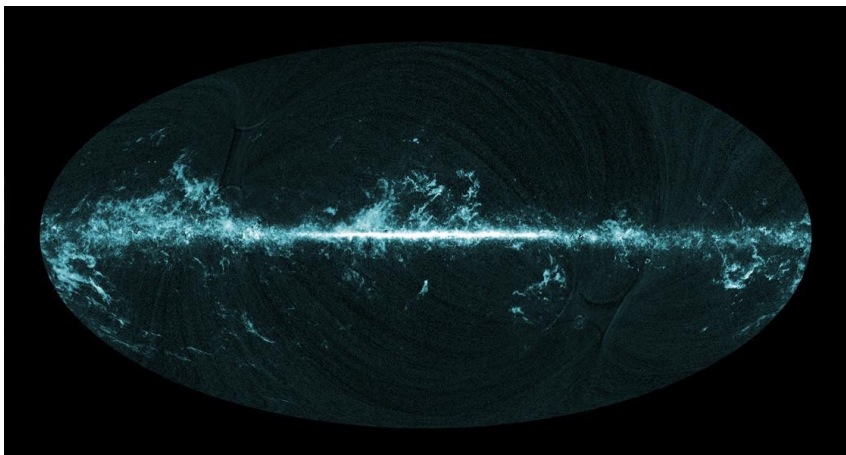


teplota

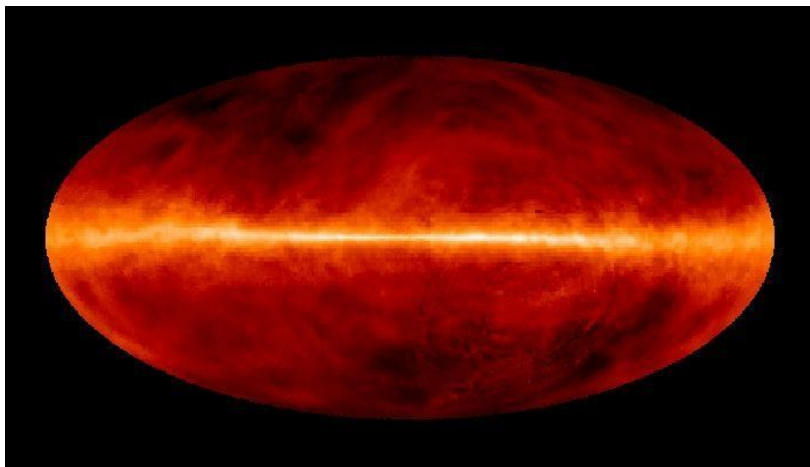


WHAM

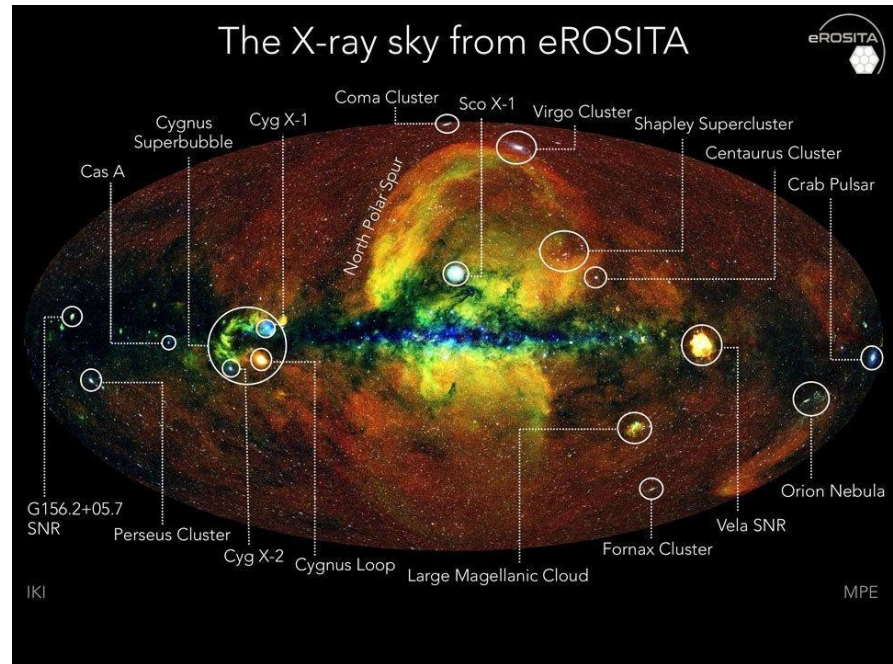
Mezihvězdné prostředí (ISM)



Planck (ESA)



HI4PI

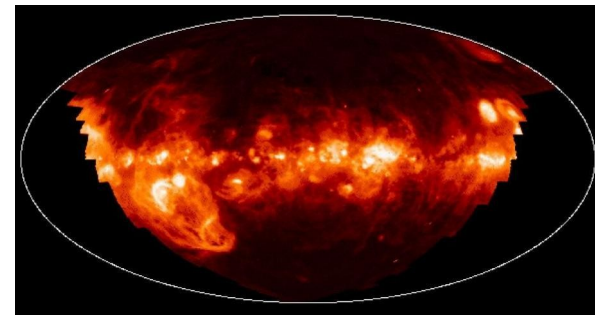


The X-ray sky from eROSITA



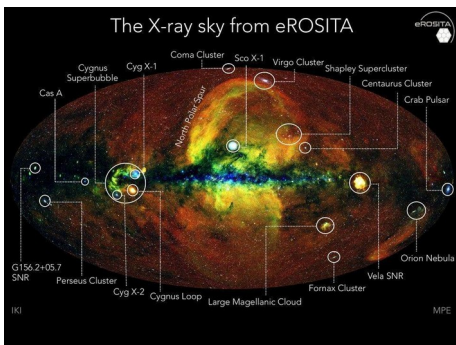
hustota

teplota

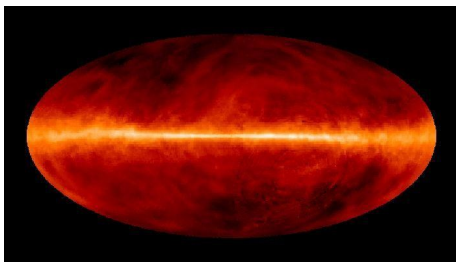
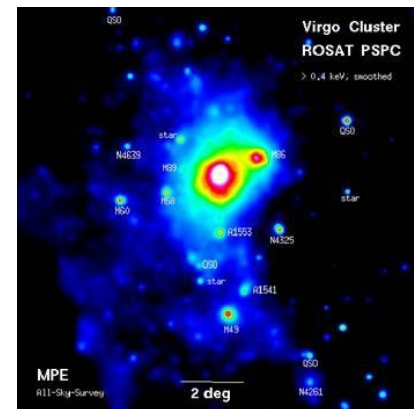


WHAM

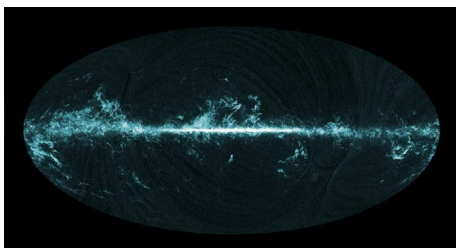
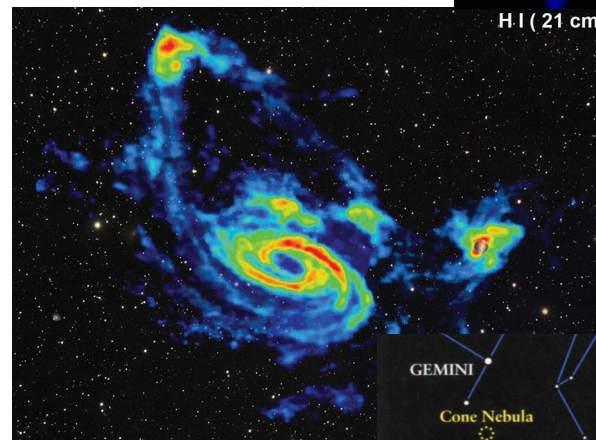
Mezihvězdné prostředí a nestability



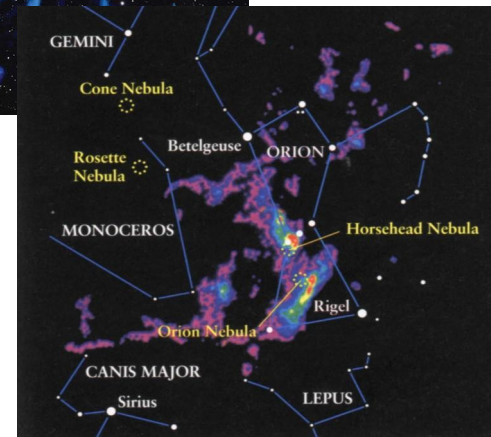
Horké ionizované prostředí
500 kpc, $3 \times 10^{12} M_{\text{sun}}$



Teplé atomární
1 kpc, $1 \times 10^8 M_{\text{sun}}$



Chladné molekulární
0.4 pc, $100 M_{\text{sun}}$

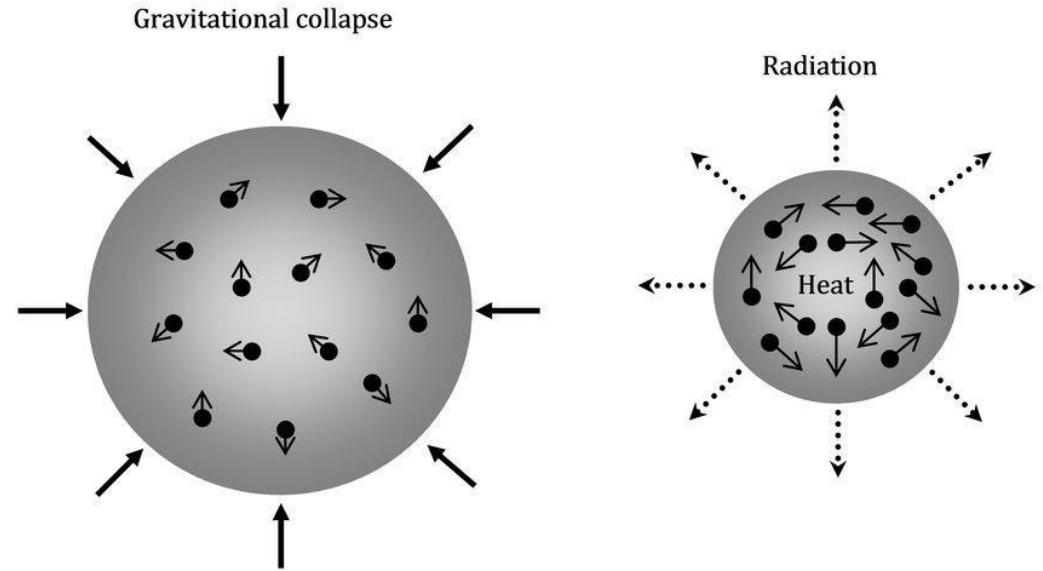
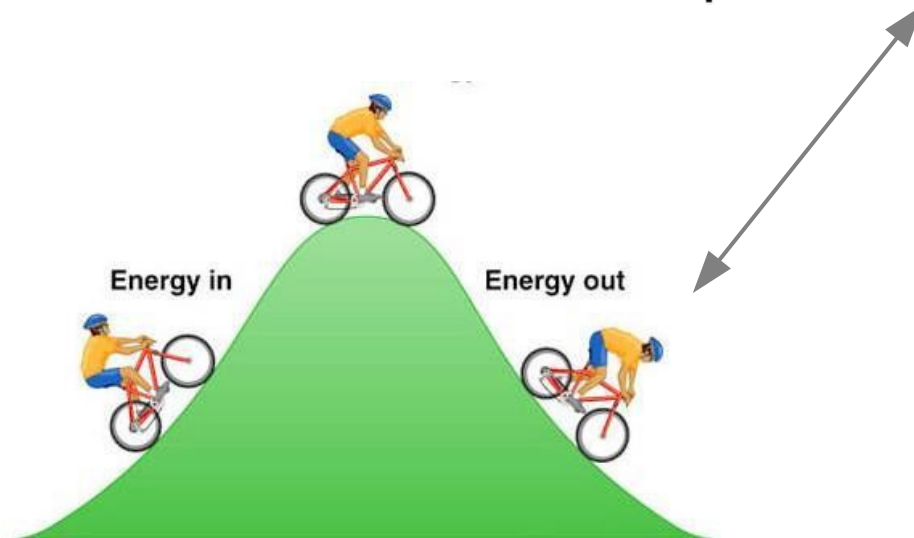


Gravitační kolaps

Nestabilita:

- smrskává se (kolabuje), potenciální energie se uvolňuje ve formě tepla
- probíhá akrece nové hmoty
- zahřívá se vnitřek

protohvězda



Gravitační kolaps

Protohvězda

- akrece, roste hmotnost
- výrazně větší než budoucí hvězda, výrazně zářivější

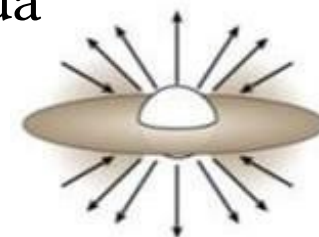
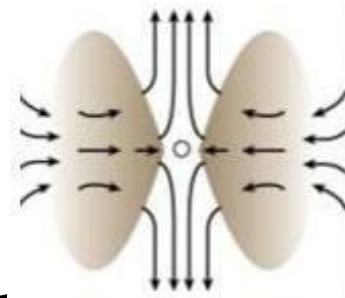
Pre-main sequence hvězda

- grav. smršťování, zmenšuje se

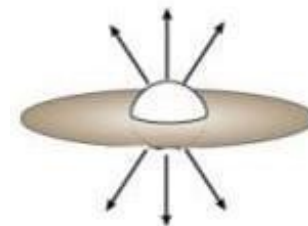
Výtrysky

Růst teploty v centru

Protohvězda



Pre-main sequence hvězda



time

Gravitační kolaps

Výtrysky

Protohvězda
- akrece

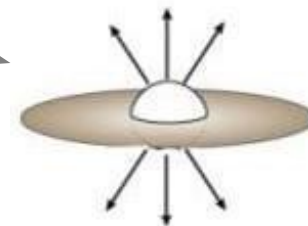
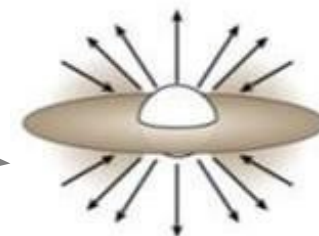
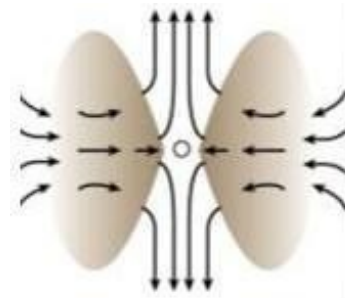
Pre-main
sequence hvězda
- gr. smršťování

Teplota v centru hvězdy:

- $M > 0.08 M_{\text{sun}}$... fúze H na He

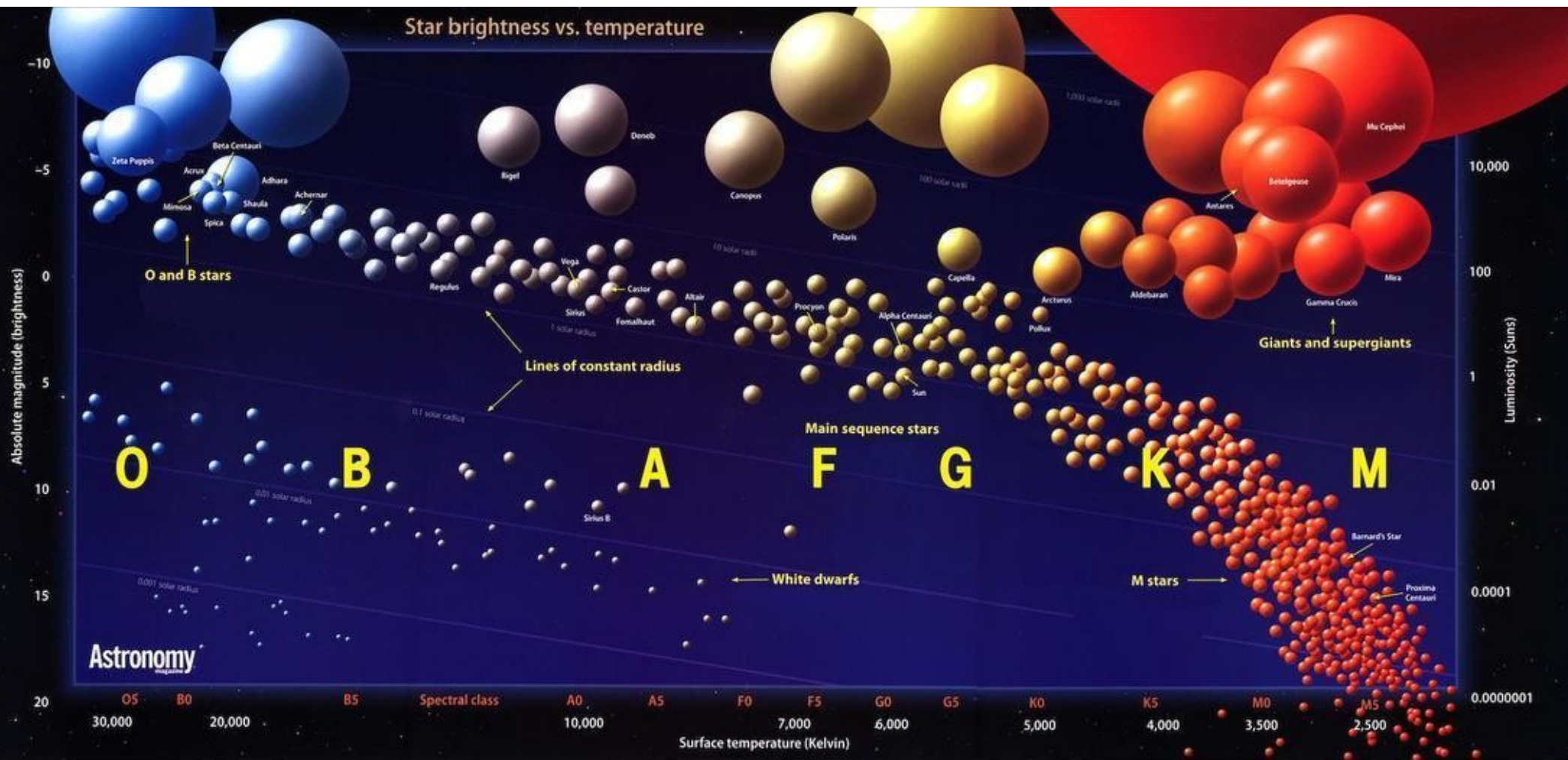
→ **hvězda**

- $M < 0.08 M_{\text{sun}}$... hnědý trpaslík



time

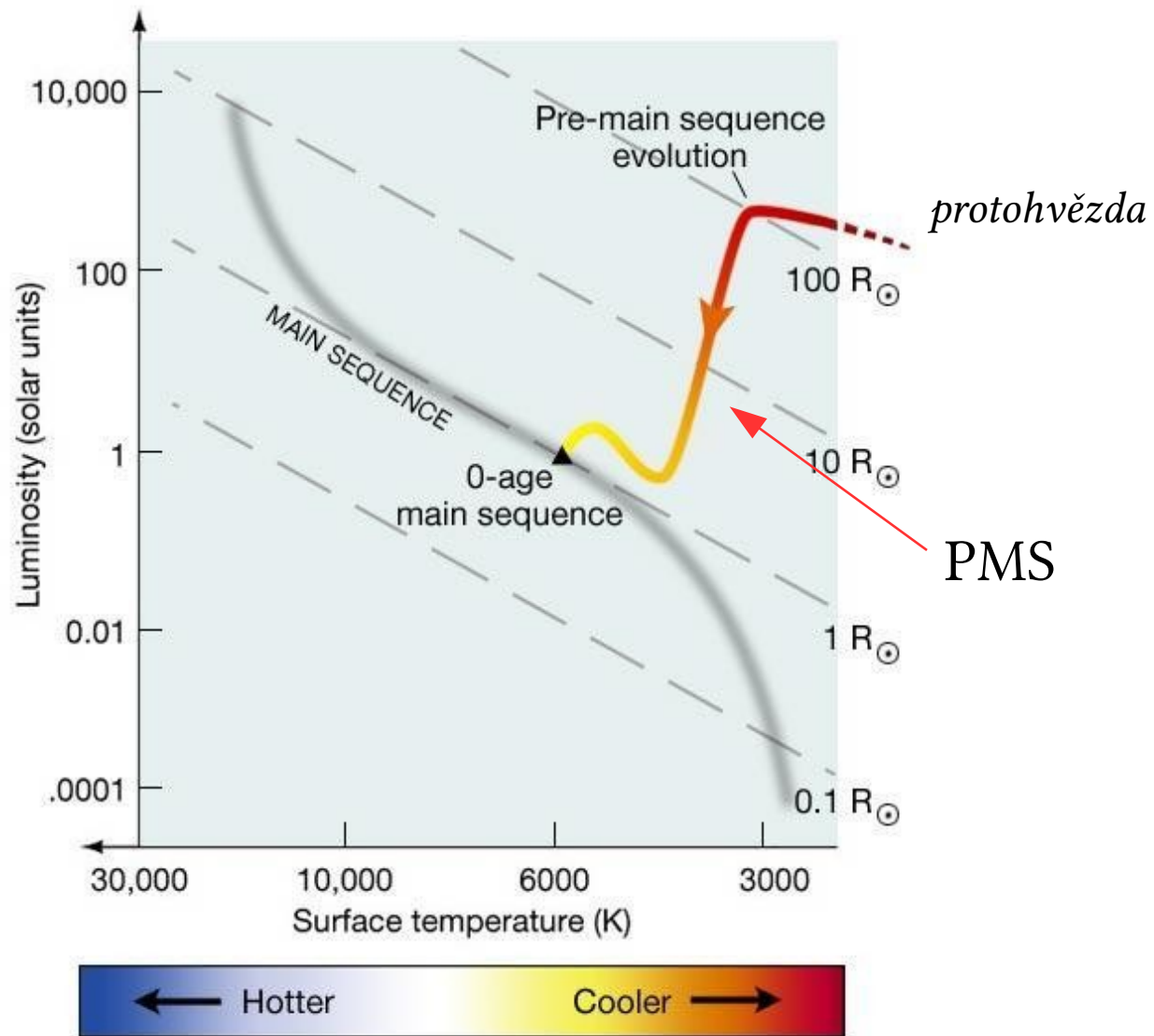
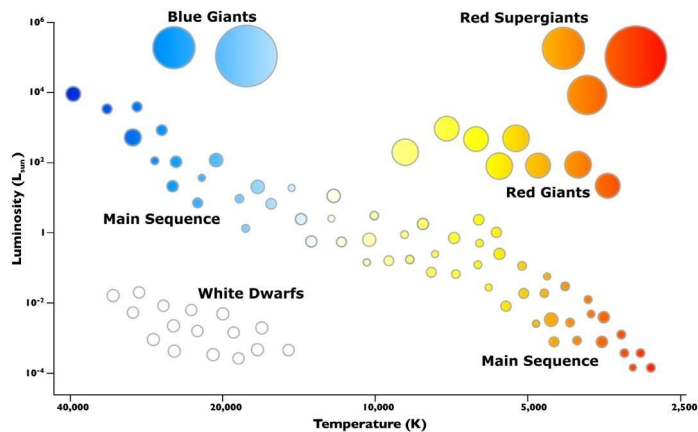
HR diagram



HR diagram

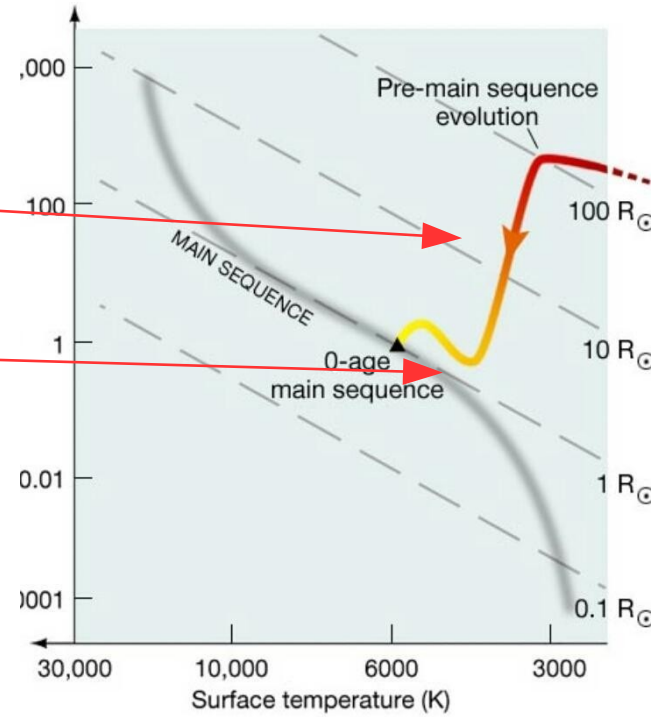
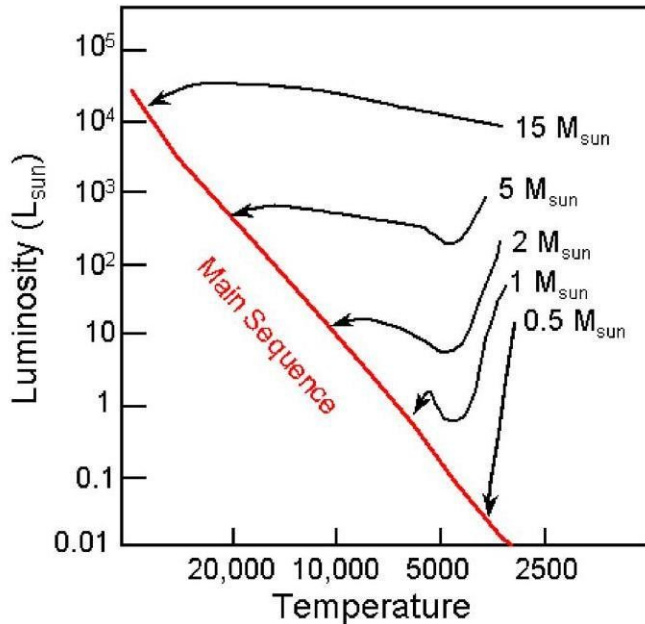
Vývoj Slunce:

- protohvězda (není na HR)
- PMS (pre-main sequence)
- MS (hlavní posloupnost)



HR diagram

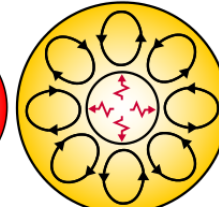
- Hayashi(ho) linie
konvektivní hvězda
- Henyey(ho) linie
jádro v zářivé rovnováze



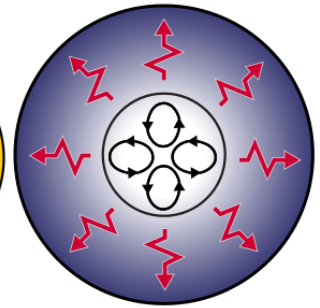
konvekce
vs
zářivá rovnováha



$M < 0.5$



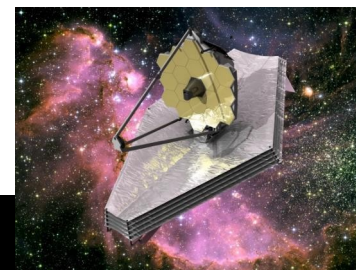
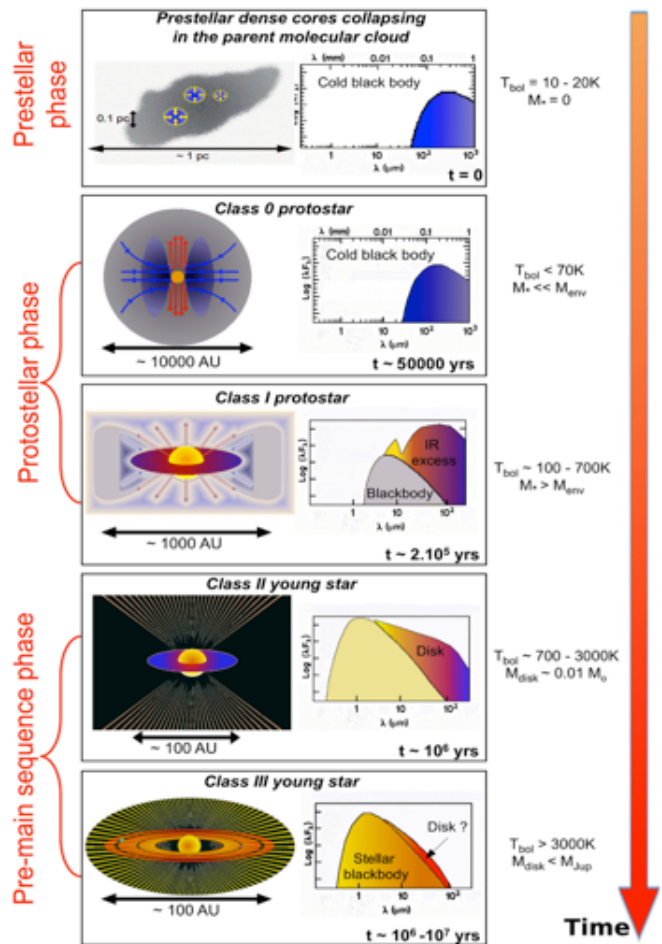
$0.5 - 1.5$



$M > 1.5$

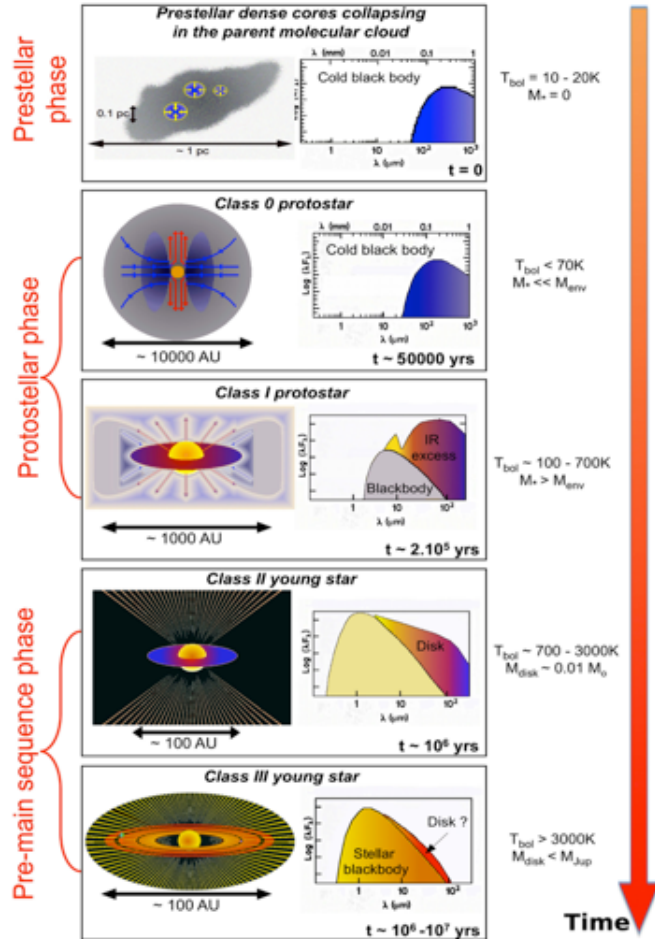


Pozorování mladých hvězdných objektů



ALMA
 Herschel (ESA)
 Spitzer (NASA)
 HST, JWST (NASA)
 VLT (ESO)

Pozorování mladých hvězdných objektů

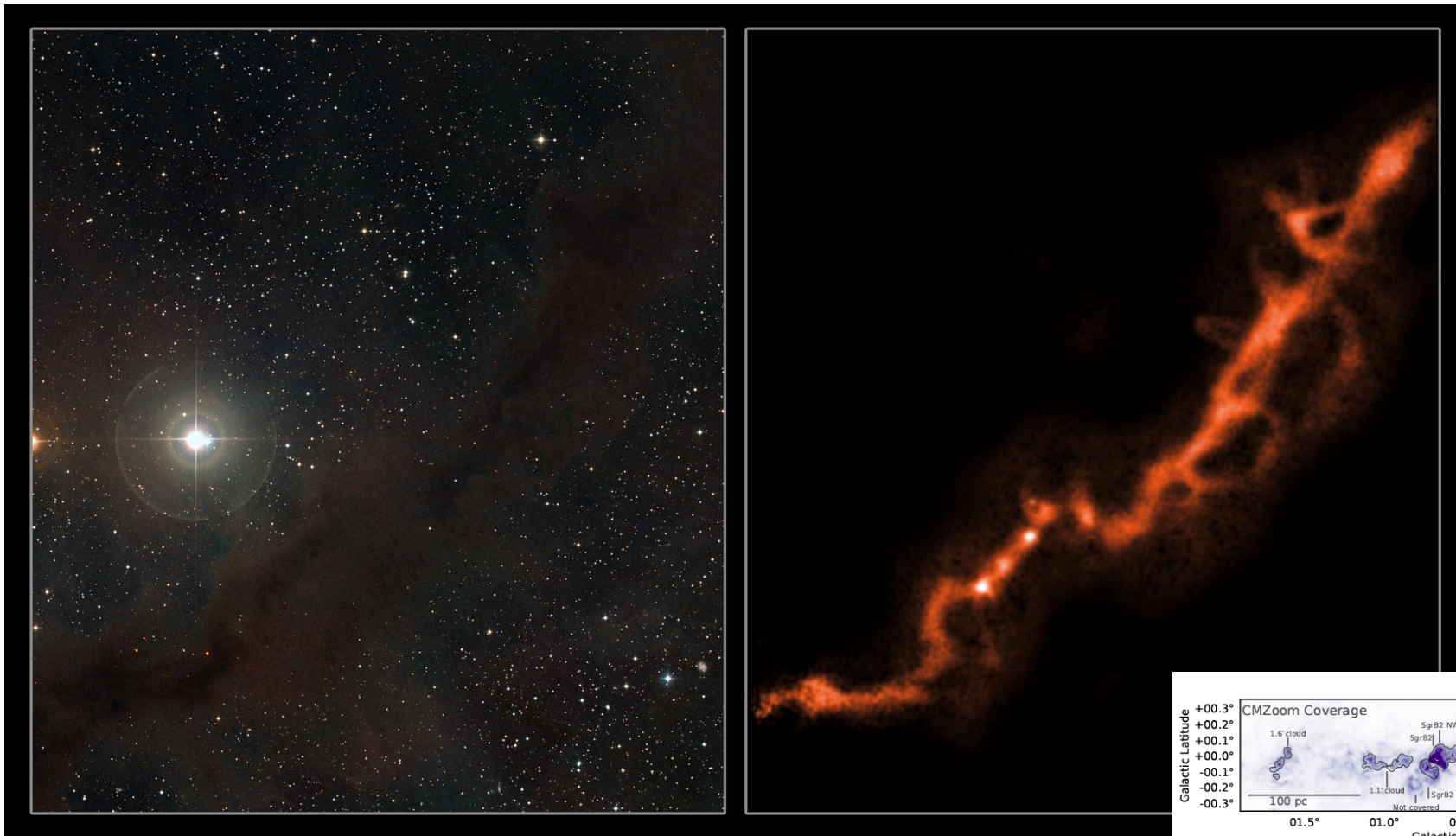


- molekulární mračna, shluky
- protohvězdy

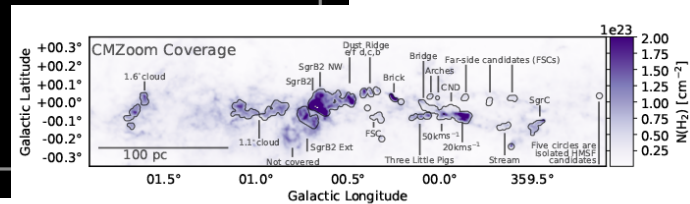
- PMS hvězdy
- Herbig Ae/Be hvězdy
- T Tauri

- výtrysky, interakce s ISM
- vzácné objekty (krátká doba života)

Molekulární mračka



Kredit: ESO

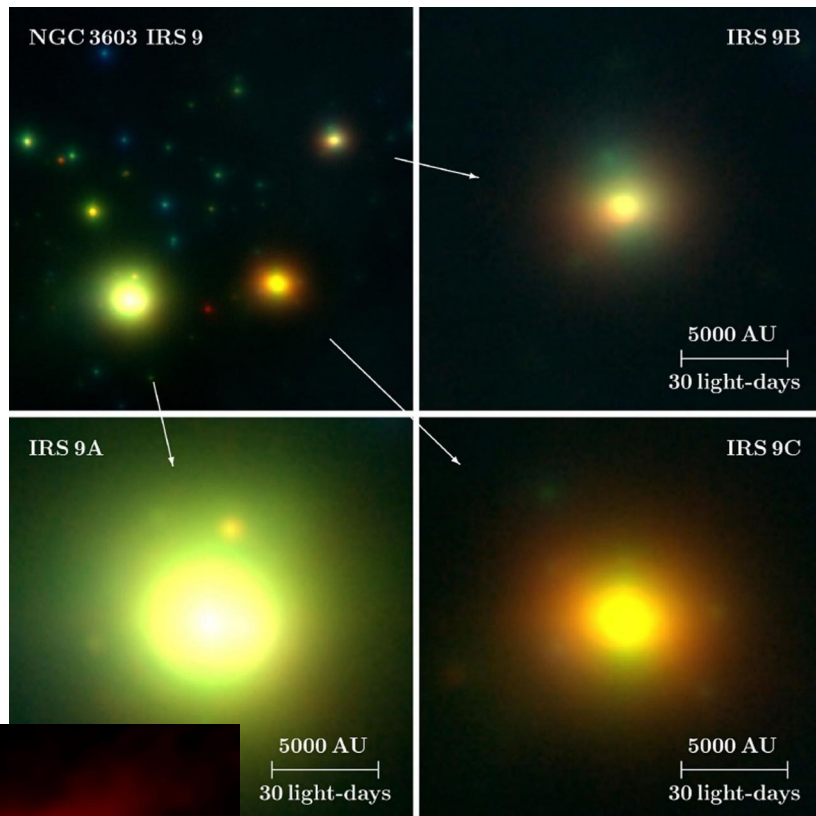
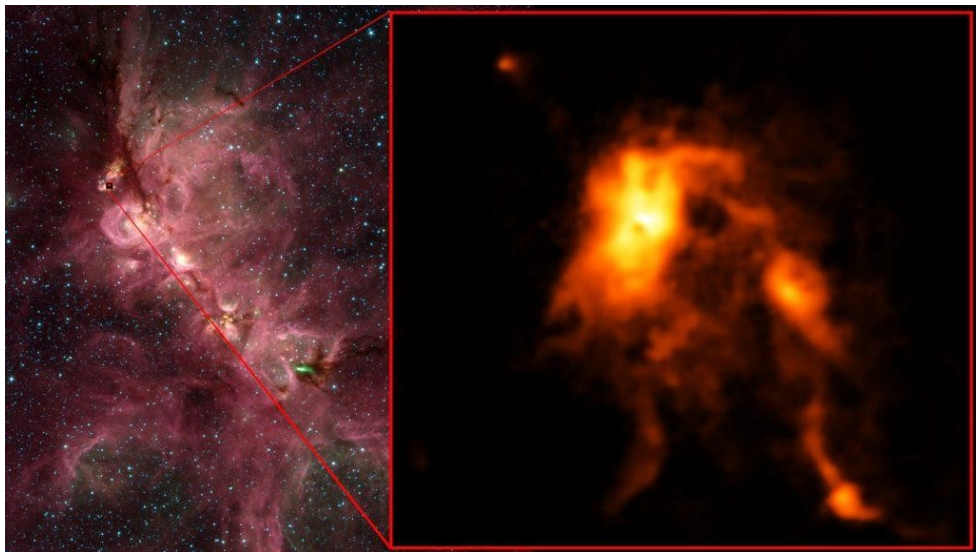


Molekulární mračna, protohvězdy



Kredit: ESA

Protohvězdy

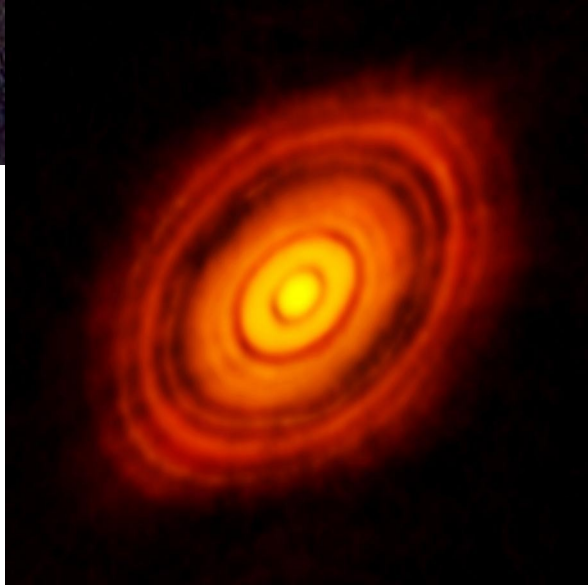


Kredit: ESO, ALMA, NASA

PMS hvězdy (Herbig Ae/Be, T Tauri)



Výtrysky
(Herbig-Haro objekty)

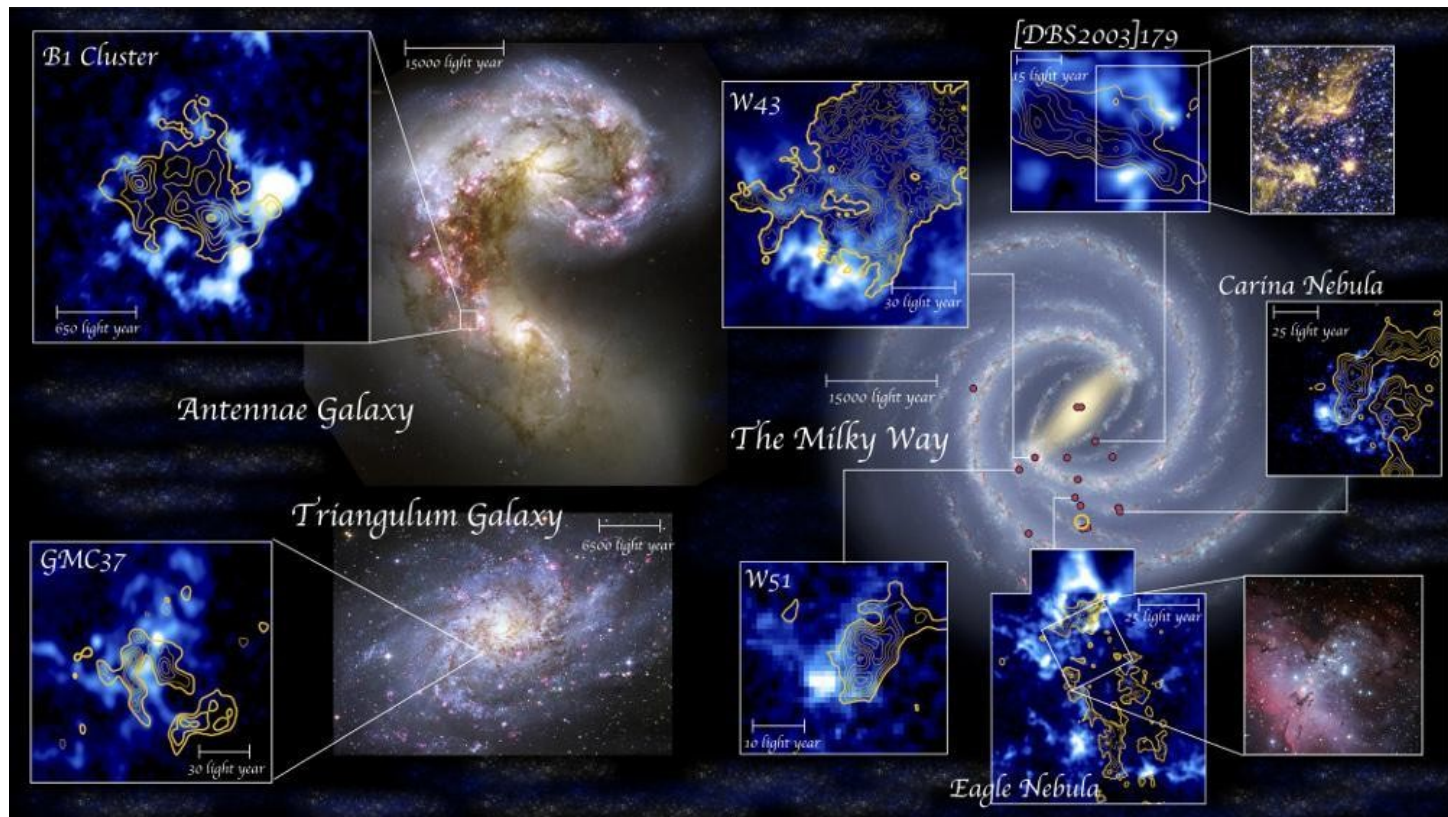
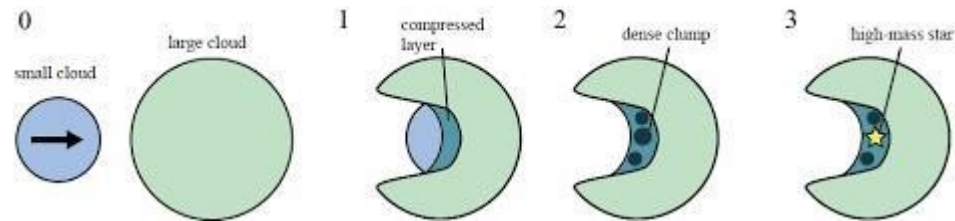


*Kredit: ESO,
ALMA*

Vznik hmotných hvězd

Kde vzít dostatečný přítok hmoty?

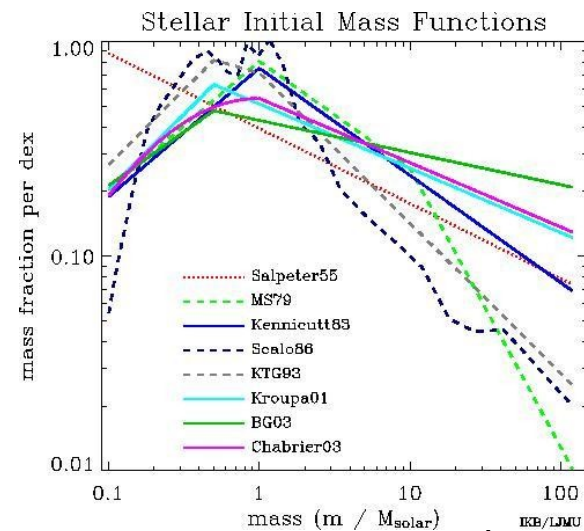
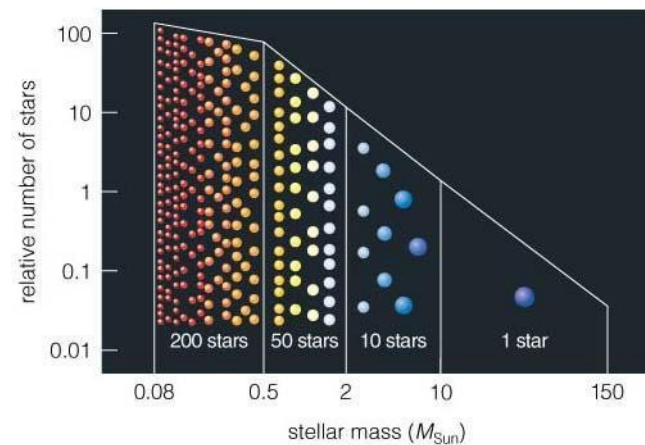
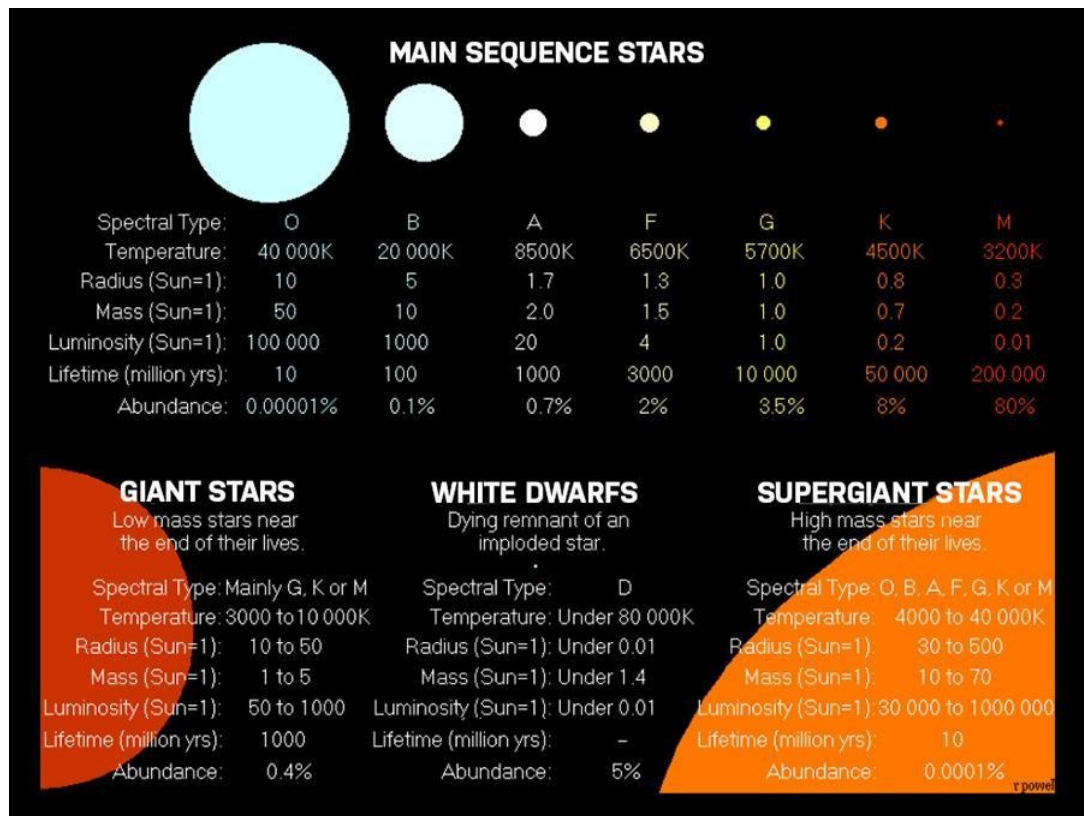
- srážky molekulárních mračen
- srážky galaxií



Počáteční funkce hmotnosti (IMF)

Tvar IMF, proč univerzální?

Clump mass function (mol. mračna)



Pomněnka

- Jaké nestability očekávat v mezihvězdném prostředí (teplota, hustota).
- Tvorba hvězd v hustých molekulárních mračnecích.
- Mladé hvězdné objekty: akrece hmoty, gravitační smršťování.
- Pozorování: radiová (mm), infračervená oblast.

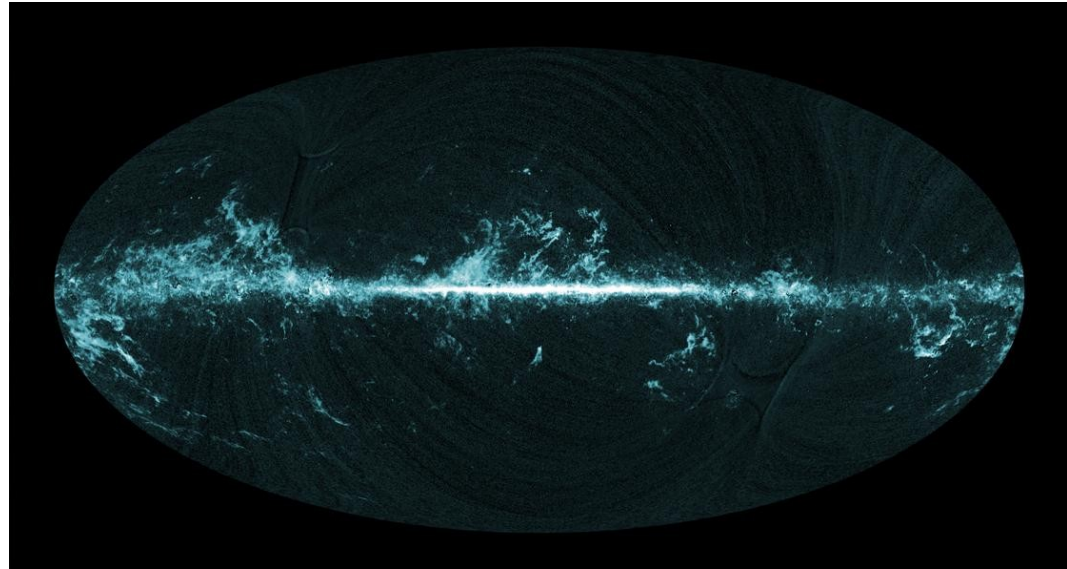
- Ještě nám není všechno jasné.

Pomněnka

- Jaké nestability očekávat v mezihvězdném prostředí (teplota, hustota).

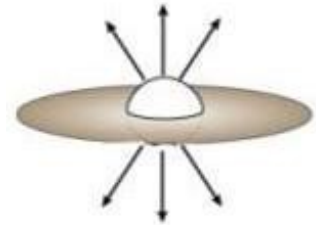
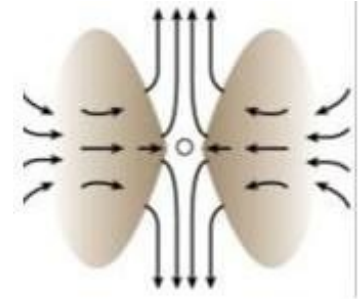
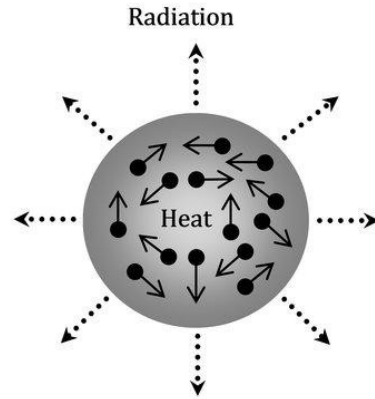
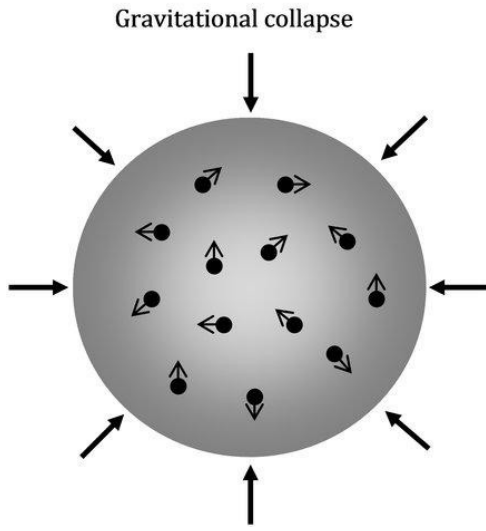
$$r_{jeans} = 0.4 \text{ pc} \left(\frac{T}{10^4 \text{ K}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$M_{jeans} = 100 M_{\odot} \left(\frac{T}{10^4 \text{ K}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$



Pomněnka

- Tvorba hvězd v hustých molekulárních mračcích.

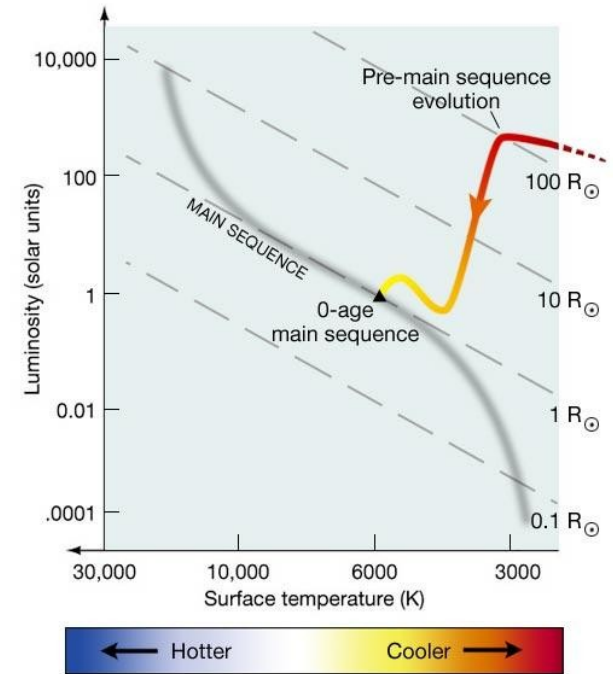
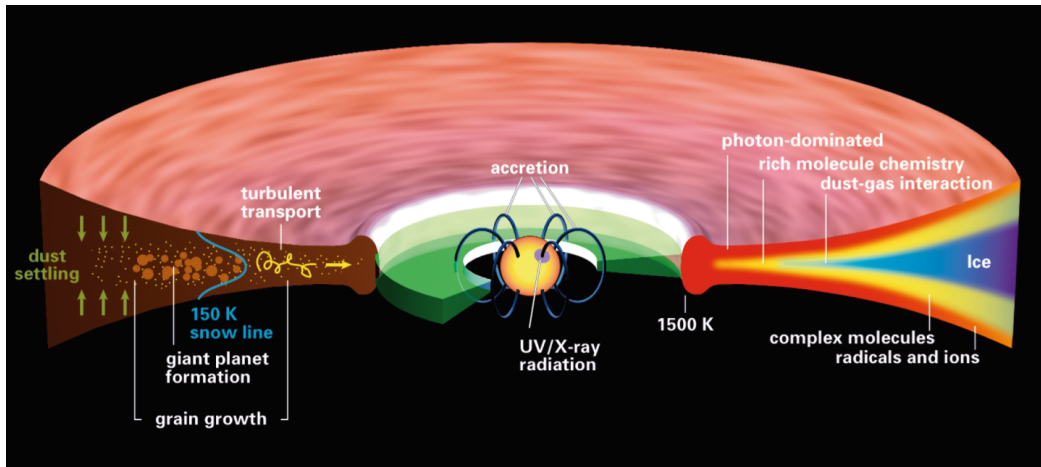


Debris + planets?

time

Pomněnka

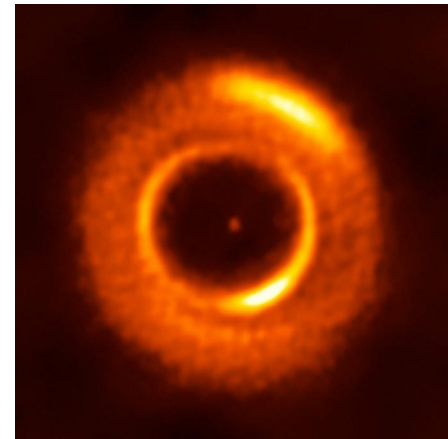
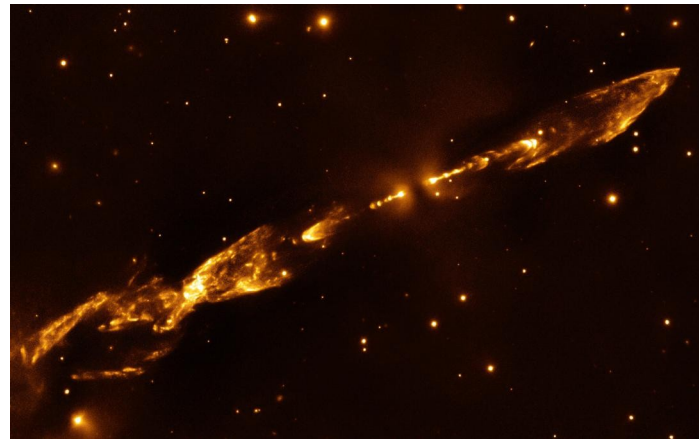
- Mladé hvězdné objekty: akrece hmoty, gravitační smršťování.



Pomněnka

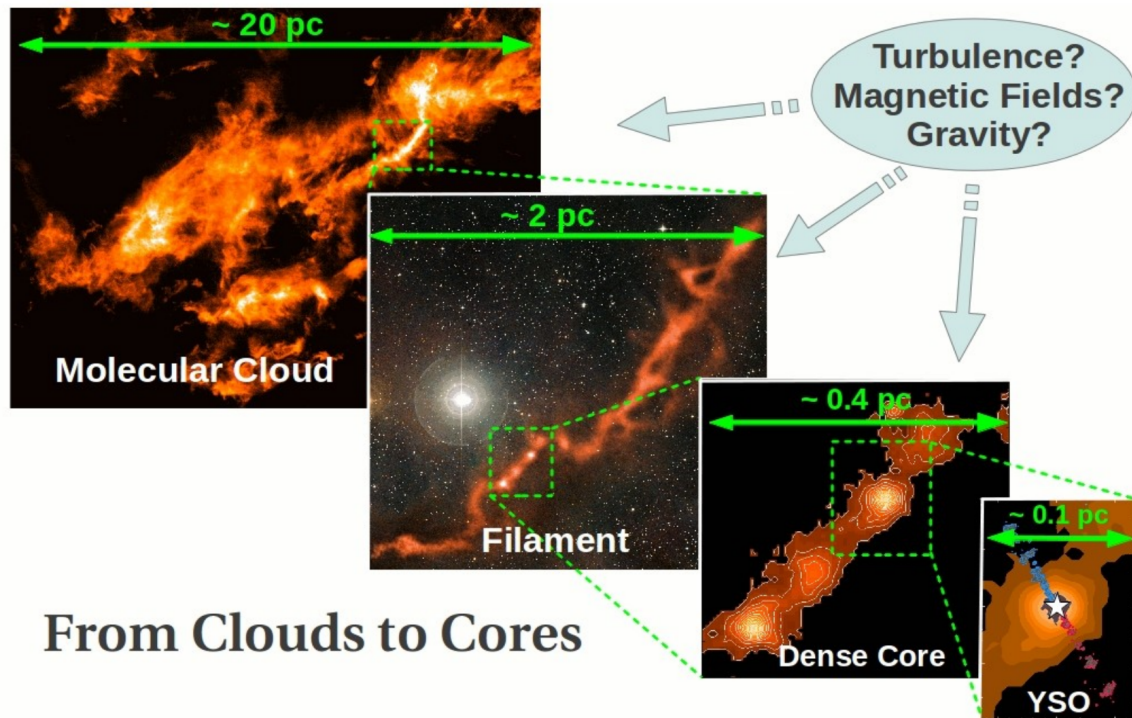
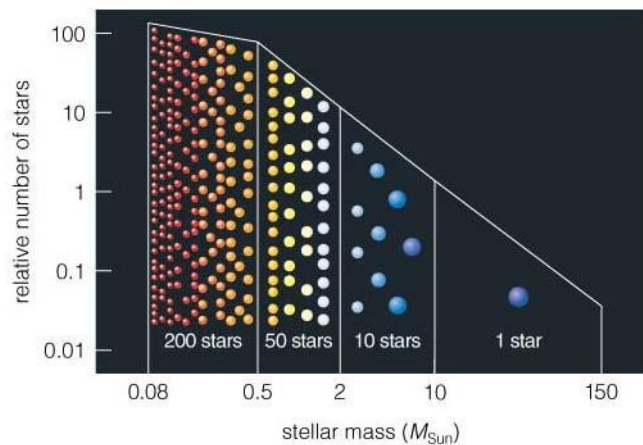


- Pozorování: radiová (mm), infračervená oblast.

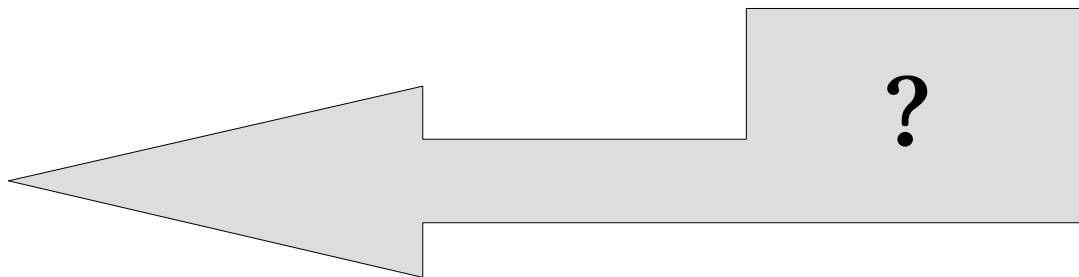


Pomněnka

- Ještě nám není všechno jasné.



From Clouds to Cores



Pomněnka

- Jaké nestability očekávat v mezihvězdném prostředí (teplota, hustota).
- Tvorba hvězd v hustých molekulárních mračcích.
- Mladé hvězdné objekty: akrece hmoty, gravitační smršťování.
- Pozorování: radiová (mm), infračervená oblast.
- Ještě nám není všechno jasné.

