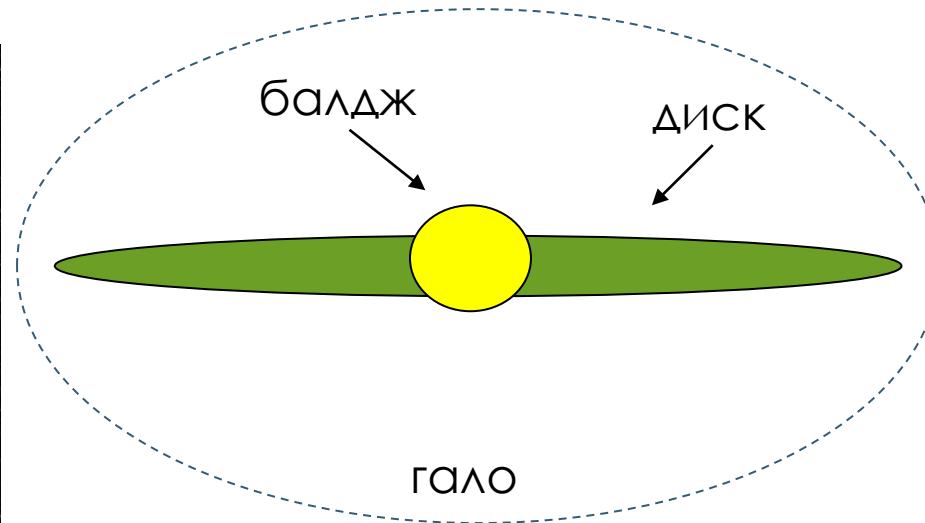




МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА

Лекции для магистров ВШЭ

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА



Межзвездная среда концентрируется к плоскости Галактики.
Хорошо виден вклад пыли в поглощение света звезд.

Газ есть не только в галактическом диске, но в других частях его плотность не достигает больших значений и не начинается формирование новых звезд.

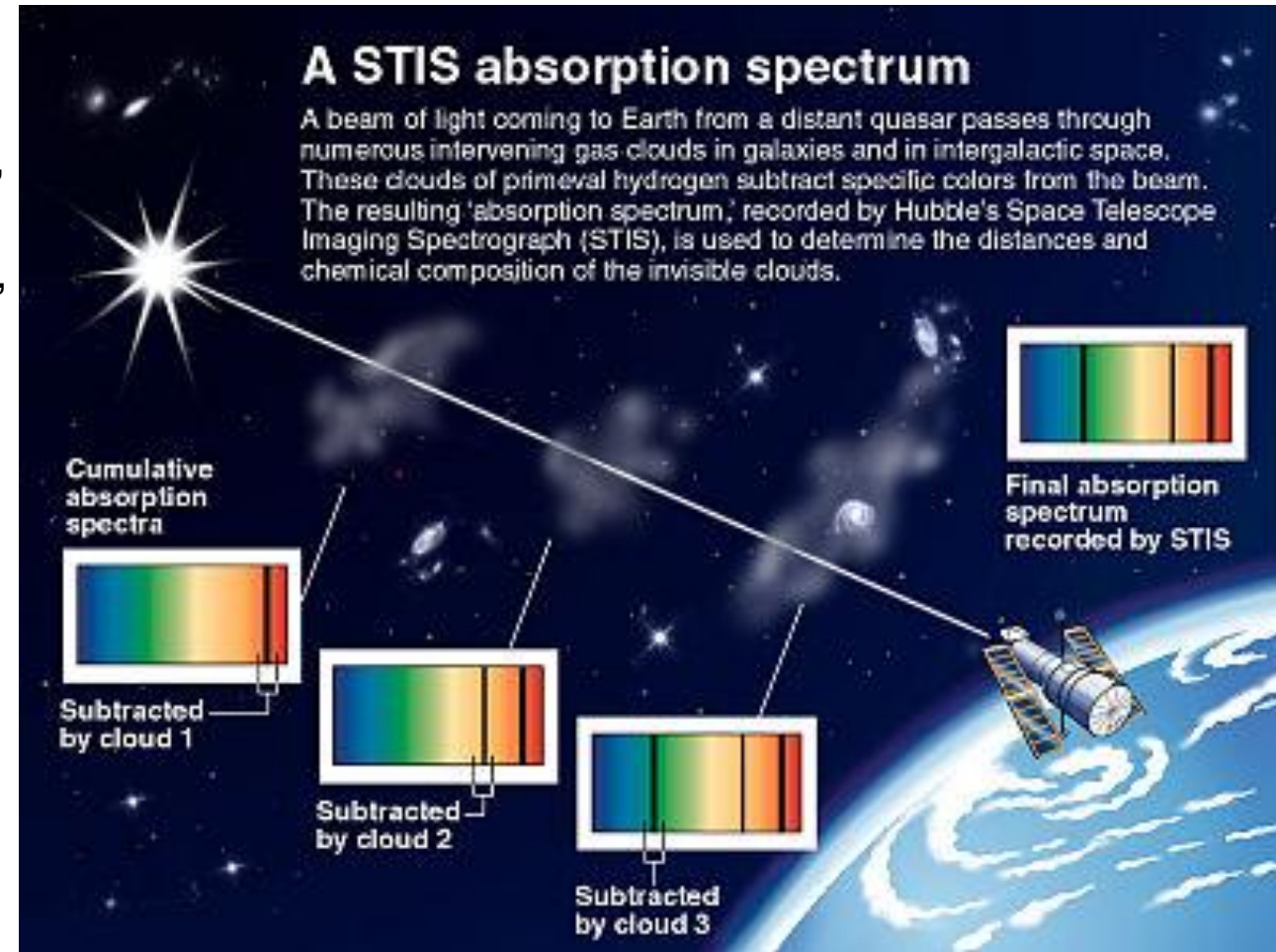


ОТКРЫТИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

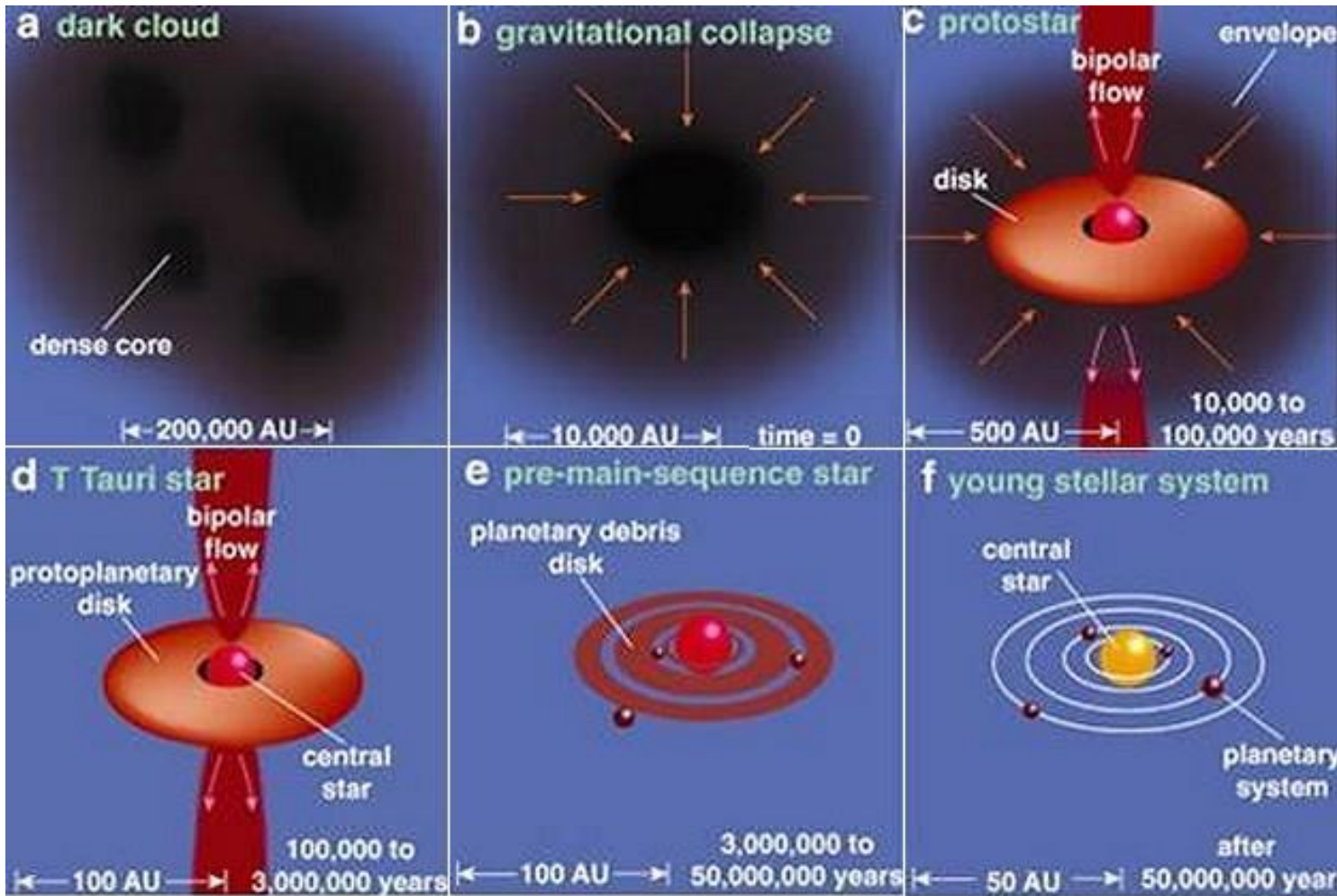
В течение сотен лет считалось, что пространство между звезд совсем пусто. В 1904 году Иоганн Гартман смог получить спектр, который однозначно говорил, что свет звезды частично поглощался «по дороге», т.е. между звездами.



Иоганн Гартман



ЭТАПЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЗВЕЗДЫ



Образование звезды начинается с постепенного сжатия плотного облака межзвездного газа и пыли.

Как правило, звезды образуются скоплениями и группами.

Весь процесс занимает от нескольких миллионов до нескольких десятков миллионов лет.

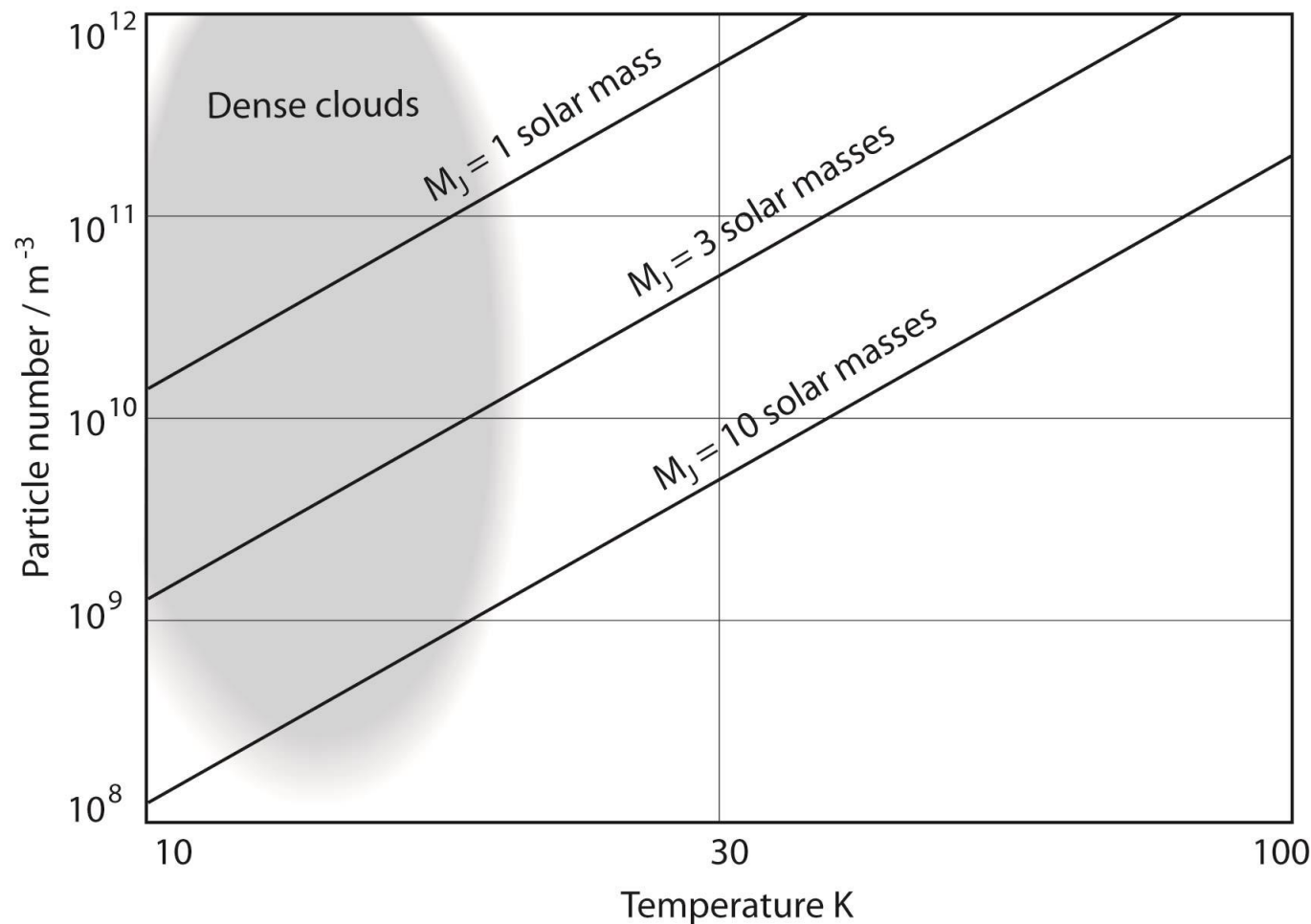
В настоящее время мы наблюдаем объекты на всех стадиях образования звезд и планетных систем.

МАССА ДЖИНСА

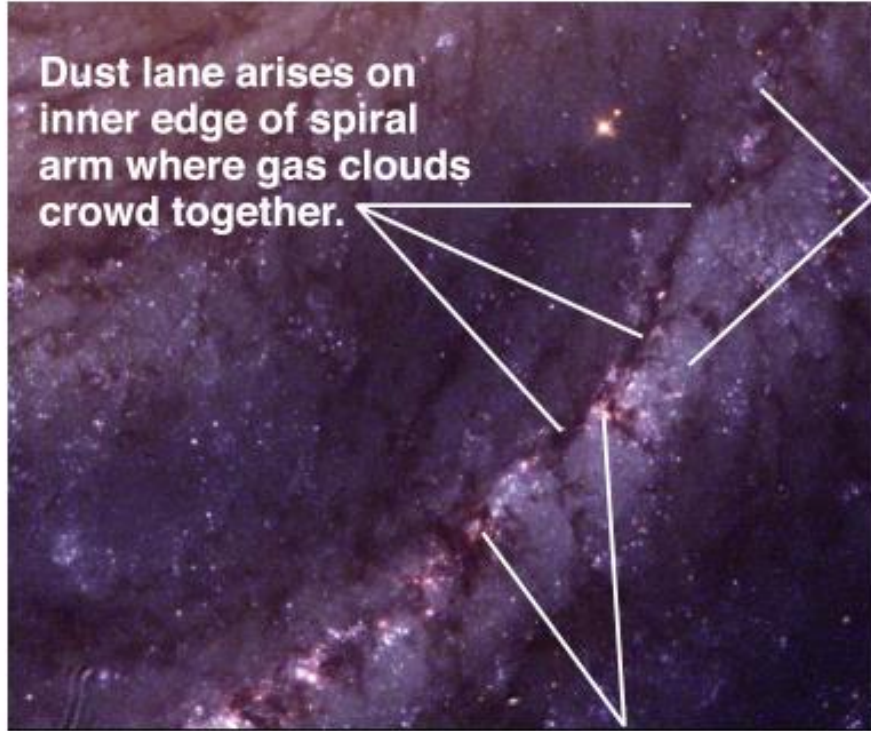
Для начала гравитационного сжатия, приводящего к образованию звезды, облако газа и пыли должно быть достаточно плотным и холодным.

Для данной температуры и плотности существует критическая масса – масса Джинса.

$$M_J = \left(\frac{5kT}{Gm} \right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\rho} \right)^{1/2}$$



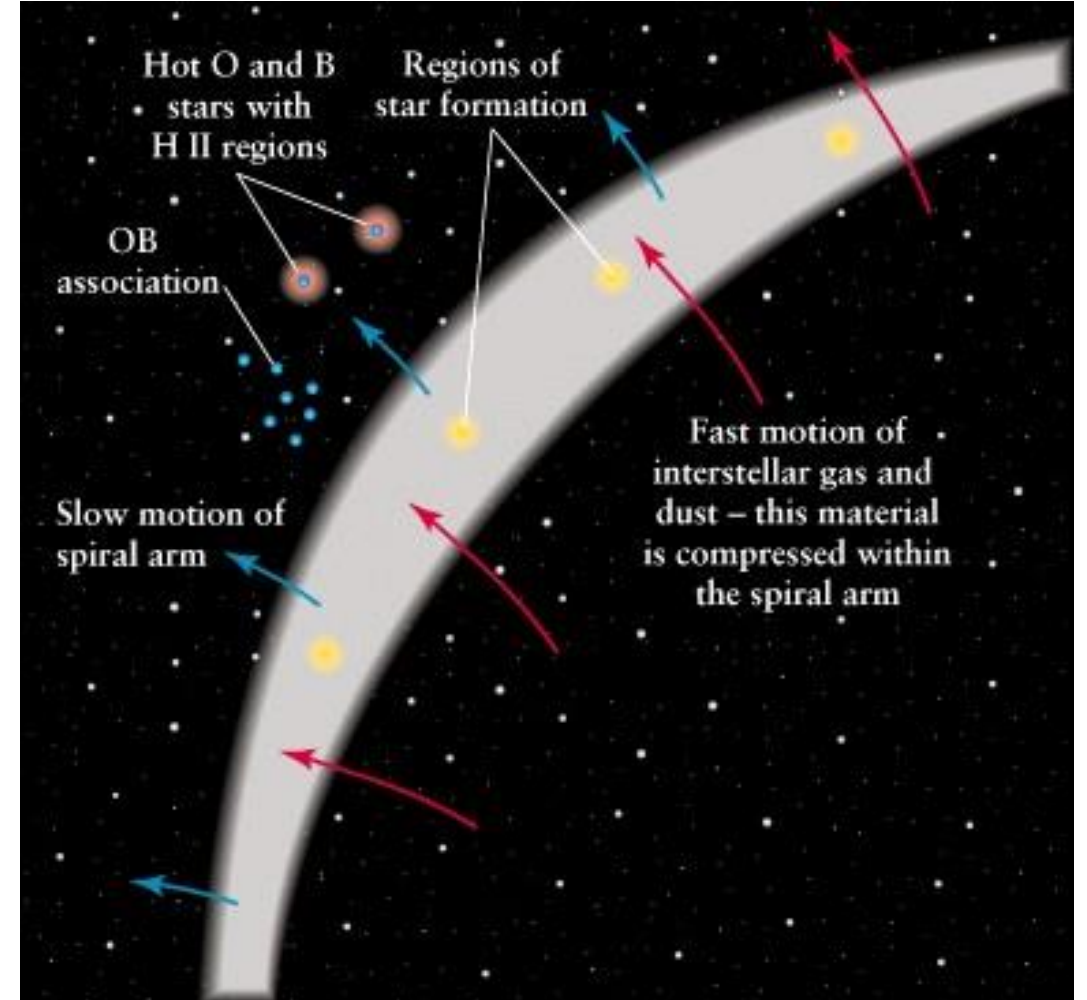
РУКАВА И ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ



Dust lane arises on inner edge of spiral arm where gas clouds crowd together.

Young blue stars are found on outer edge of spiral arm.

Ionization nebulae arise where newly forming blue stars are ionizing gas clouds.



ФАЗЫ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

Component	Fractional volume	Scale height (pc)	Temperature (K)	Density (particles/cm ³)	State of hydrogen	Primary observational techniques
Molecular clouds	< 1%	80	10–20	10 ² –10 ⁶	molecular	Radio and infrared molecular emission and absorption lines
Cold neutral medium (CNM)	1–5%	100–300	50–100	20–50	neutral atomic	H I 21 cm line absorption
Warm neutral medium (WNM)	10–20%	300–400	6000–10000	0.2–0.5	neutral atomic	H I 21 cm line emission
Warm ionized medium (WIM)	20–50%	1000	8000	0.2–0.5	ionized	H α emission and pulsar dispersion
H II regions	< 1%	70	8000	10 ² –10 ⁴	ionized	H α emission and pulsar dispersion
Coronal gas Hot ionized medium (HIM)	30–70%	1000–3000	10 ⁶ –10 ⁷	10 ⁻⁴ –10 ⁻²	ionized (metals also highly ionized)	X-ray emission; absorption lines of highly ionized metals, primarily in the ultraviolet

[arxiv:1803.02277](https://arxiv.org/abs/1803.02277) Межзвездная среда: от молекул до звездообразования

[arxiv:1412.5182](https://arxiv.org/abs/1412.5182) Физические процессы в межзвездной среде

[arxiv:1206.4090](https://arxiv.org/abs/1206.4090) Межзвездное поглощение и межзвездная поляризация

[arxiv:1104.2949](https://arxiv.org/abs/1104.2949) Межзвездная пыль

[arxiv:2004.06113](https://arxiv.org/abs/2004.06113) Жизненный цикл молекулярного облака

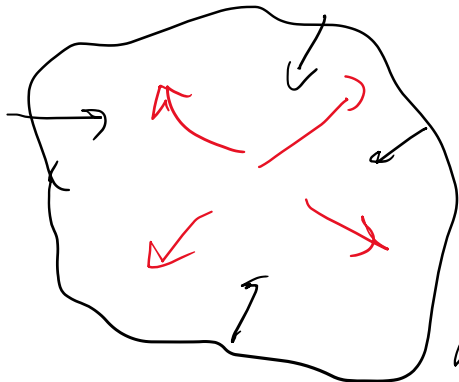
1) $2 F_x + \frac{F_p}{<0} = 0$ (buoyancy)

$$2 N \frac{3}{2} kT = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \quad N = \frac{M}{m} \quad M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$$

$$\frac{1}{5} \frac{GM}{R} = \frac{kT}{m} \Rightarrow \frac{1}{5} \frac{G}{R} \frac{4}{3} \pi R^3 \rho = \frac{kT}{m}$$

$$R_J = \left(\frac{15 kT}{4 \pi m G \rho} \right)^{1/2} \quad M_J = \frac{5 kT}{G m} \quad R_J = 3 M_\oplus \frac{T}{10 K} \quad \frac{R_J}{10^{15} \text{ cm}}$$

2)



$$t_{ff} \approx \frac{1}{\sqrt{G \rho}}$$

$$t_S = R / c_s$$

$$c_s^2 = \frac{\gamma P}{\rho}$$

$$P V = \frac{m}{\mu} R T$$

$$P = \frac{\rho}{\mu} R T$$

$$c_s = \sqrt{\frac{R}{\mu} T} \quad R = k \cdot N_A$$

$$N_A = \mu / m$$

$$c_s = \sqrt{\frac{kT}{\mu}}$$

$$R_J = \left[\frac{R_J}{c_s} = \frac{1}{\sqrt{G \rho}} \right] = \frac{c_s}{\sqrt{G \rho}} = \sqrt{\frac{kT}{\mu G \rho}} = \sqrt{\frac{R T}{\mu G \rho}}$$

1. Pugno $\epsilon = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2$ $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n}{m_e}} = 5,64 \cdot 10^4 \sqrt{n_e}$
 $\lambda < 1 \mu$
 $e^{i(\omega t - kx)}$ $k = 2\pi/\lambda$ $c^2 k^2 = \epsilon \omega^2 = \omega^2 - \omega_p^2$ $n = \sqrt{\epsilon}$

$\omega < \omega_p$ (X)

$U_{ph} = \omega/k = c/\sqrt{\epsilon} = c/n > c$ $U_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = cn < c$

$t(\omega) = \int_0^l \frac{ds}{U_g} = \frac{l}{cn} \approx \frac{l}{c} + \frac{1}{2c} \int_0^l \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 ds$

$\Delta t(\omega) = \frac{1}{2c} \int \frac{\omega_p^2}{\omega^2} ds = \frac{2\pi e^2}{m_e c \omega^2} \int n_e ds$ $DM = \int_0^l n_e ds$

$\Delta t_{1,2} = 4,6 \text{ usec } (A_1^2 - A_2^2) DM$ $\{DM\} = \frac{h\nu}{c \mu^3}$

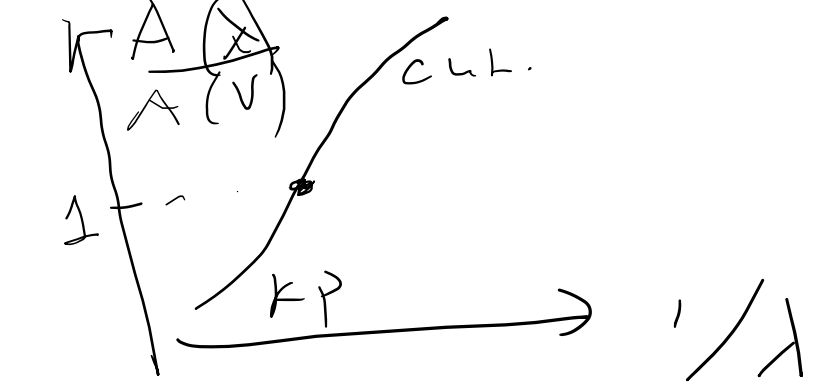
$\bar{n}_e = 0,03 \text{ cm}^{-3}$

$DM \approx \int_0^l n_e \cdot B_{11} ds$

2. $\mu_k, \sigma_{\mu}, \gamma_{\mu}$

a) $\mu_{\text{norm.}} \sim 1/\lambda$

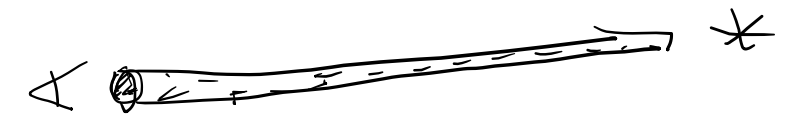
$\mu_H \sim 1 \text{ cm}^{-3}$



$$\frac{A(\lambda)}{A(\nu)}$$

ножечка

$\tau_{\nu} \approx 5 \cdot 10^{-22} \mu_H$



$l = 1 \text{ km} = 3,1 \cdot 10^{21} \text{ cm}$

$\tau_{1 \text{ km}} \approx 1,5$

8) $\mu_{\text{norm.}} \text{ rayon}$

Воз. $13,6 \text{ эВ} \rightarrow 912 \text{ \AA}$

i. $\mu_{\text{norm.}} (\text{фотопфф})$ $\tau_x = 2 \cdot 10^{-22} \left(\frac{h\nu}{13,6 \text{ эВ}} \right)^{-8,73} \int \mu_H d\ell$

ii. $E > 10 \text{ кэВ}$
 $g_0 511 \text{ кэВ}$

компл. $\rho_{\text{acc.}}$

$> 511 \text{ кэВ}$ $\sigma_T \frac{m_e c^2}{h\nu} < 1$

iii. $E > 511 \text{ кэВ}$

$e^- e^+$

$\partial \delta'_{em}$ окр. $\Lambda(n, T)$ $\partial \rho^2 / \text{cm}^3 / \text{c}$
 $\partial \delta'_{em}$ кер. $\Gamma(n, T)$ $\partial \rho^2 / \text{cm}^3 / \text{c}$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dE}{dt} + p \frac{dV}{dt} = T - \Lambda \quad \frac{dQ}{dt} = 0 \Rightarrow T = \Lambda$$

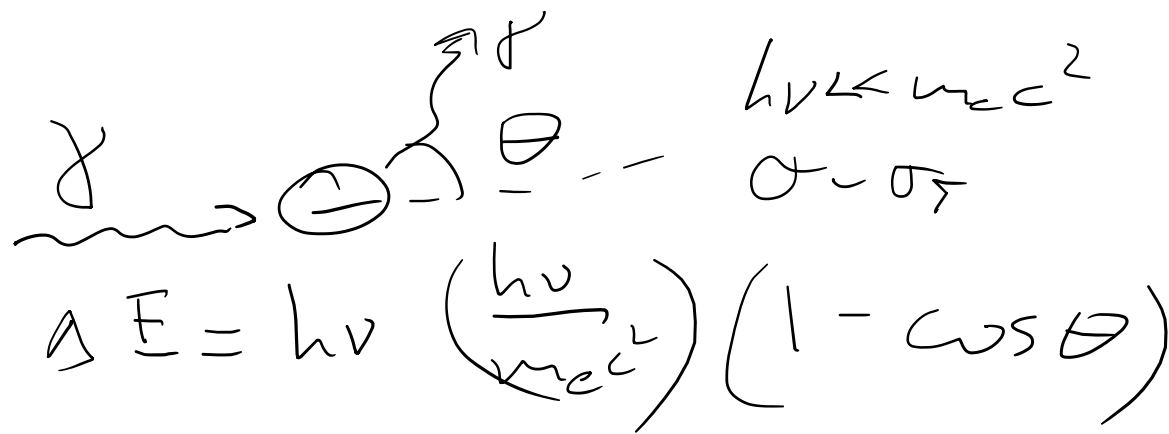
Назвал. 1. УФ изл. (фотонин)

$$\frac{m_e v^2}{2} = h\nu - \epsilon_i$$

2. Угол локты.

3. Косм. лучи.

4. мест. изл. фотонин + косм.



$$\Gamma_c = n_e \sigma_T \cdot c \int_0^\infty \frac{h\nu}{m_e c^2} U_\nu d\nu$$

0xa. 1. free-free (free-free)

$$\Lambda_{ff} \sim n_e^2 \sqrt{T} \quad T > 10^6 \text{ K}$$

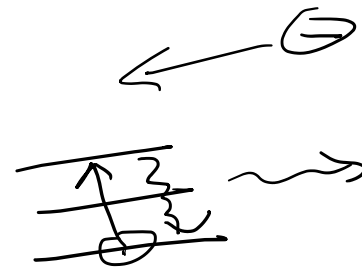
2. Рекомб. $h\nu = \zeta_i + \frac{m_e v^2}{2} \quad \zeta_i \gg \frac{m_e v^2}{2}$

$$T < 10^5 \text{ K}$$

$$\Lambda_{rec} \sim n_e \cdot n_i Z_i^4 T_e^{-1/2}$$

3. Дыхот. уз. $T \approx 10^6 - 10^8 \text{ K}$

4. Оджан. нонн. $\frac{\Delta v}{v} = \frac{v}{c} \sim \sqrt{\frac{kT}{m_e c^2}}$



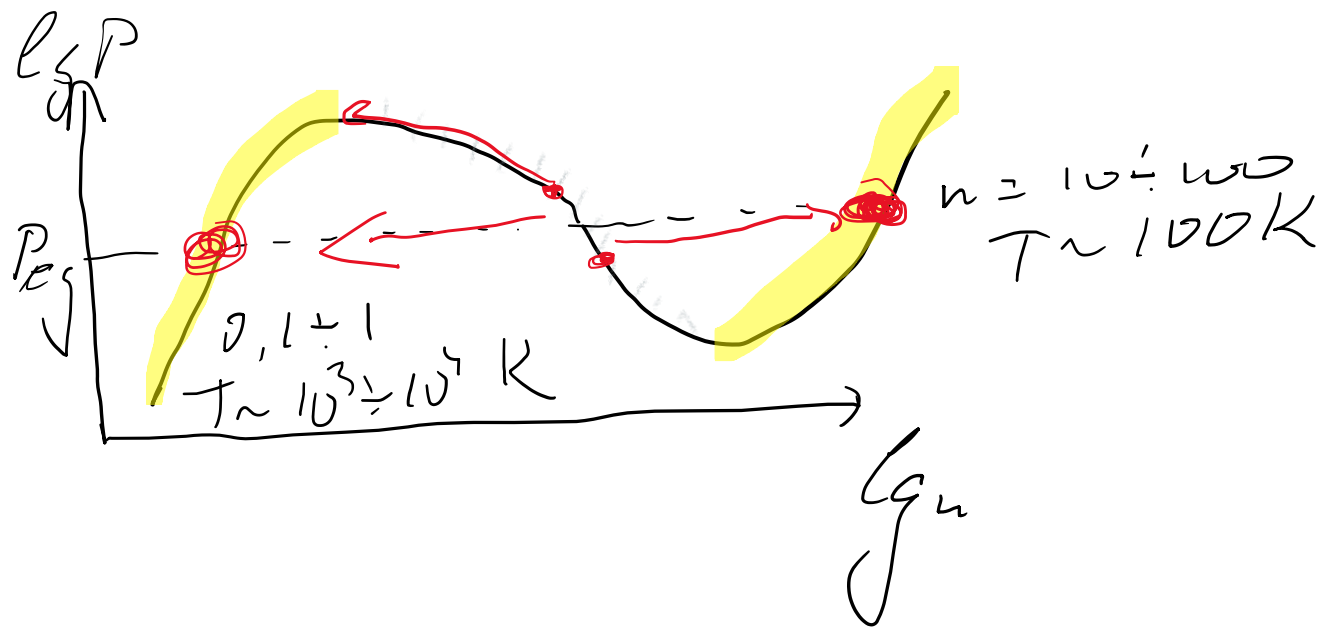
5. Уз. в нитях.

6. Нонн. за. уз. уз.

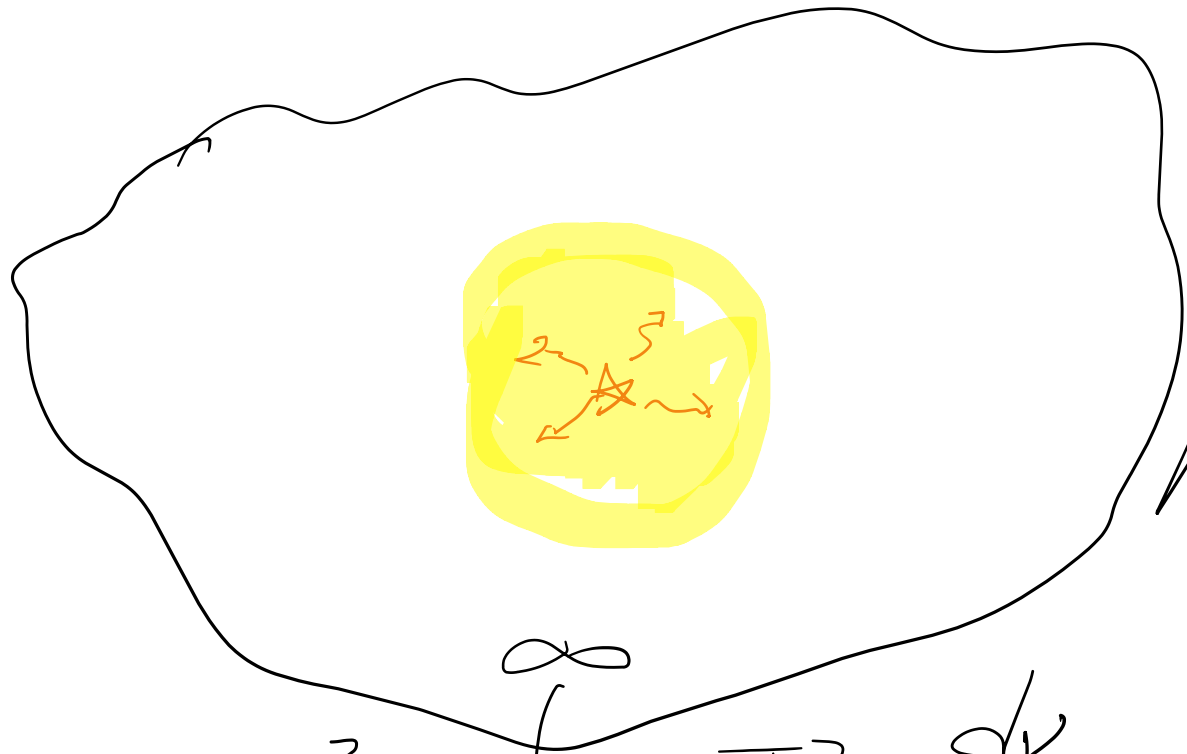


$$A(\nu, T) = n^2 \lambda(T)$$

$$A_{rec} = \underline{\underline{n_e n_i}} T^{-1/2}$$



H II



$$\Delta p = \frac{0,1 \text{ bar}}{n_e}$$

$$N_{Ly\alpha} = \frac{4}{3} \frac{P}{h\nu} \sum_{i=2}^{\infty} \alpha_i n_e n$$

$$N_{Ly\alpha} = \frac{4}{3} \frac{P}{h\nu} \int_{3,3 \cdot 10^{15}}^{\infty} \pi B_{\nu} \frac{d\nu}{h\nu}$$

$$T = 35000 \text{ K} \quad R_{*} = 10^{11} \text{ cm}$$

$$N_{Ly\alpha} = 16 n^2 \left(\frac{R_{*}}{c} \right)^2 \left(\frac{hT_{*}}{h\nu_c} \right)^3 \nu_c^3 \cdot e^{-\frac{h\nu_c}{kT_{*}}} \approx 3 \cdot 10^{48} \frac{nl}{c}$$

$$n_e = n_p = 1$$

$$P_{HII} \approx 0,5 \text{ Wk}$$

$$\frac{5}{2} \sigma_T c f^2 u_m = \frac{B^2}{8\pi} = \left(\frac{dE}{dt} \right)$$

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-\delta}$$

$$I(\nu) \sim \nu^{-\frac{(\delta-1)}{2}}$$

$$p(t) = A \cdot \exp \{ i(\omega t + kr) \}$$

$$\frac{\delta p}{p_0} \sim e^{\omega t}$$

$$\omega \sim \sqrt{G \rho_0}$$

$$c_s^2 = \frac{dP}{d\rho} = \gamma \frac{P}{\rho}$$

$$\gamma = C_p / C_v$$

$$\lambda_s = c_s \sqrt{\frac{\pi}{G \rho_0}}$$

$$M_s = \rho \lambda_s^3 \sim \rho^{\frac{3}{2} \gamma - 2}$$

$$\frac{dM_s}{d\rho} > 0 \quad - \text{конанс } \delta \rho \text{ фазам.}$$

$$\gamma = 4/3$$

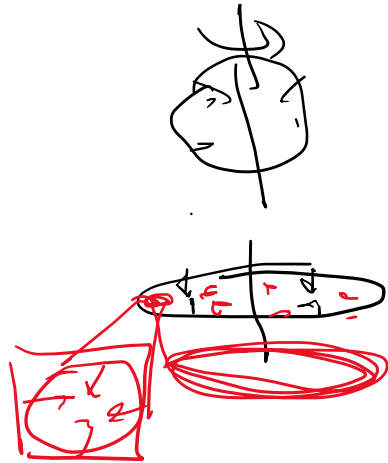
$$\gamma = 1 \quad \text{узоре рм.}$$

$$E_{rot} = \frac{I \Omega^2}{2}$$

$$J = I \Omega \sim MRV$$

$$\frac{V^2}{R} = \frac{GM}{R^2}$$

$$\alpha_{rot} = \frac{E_{rot}}{F_{grav}} \sim \frac{J^2}{6M^3R}$$



$$\alpha_B = \frac{\frac{4}{3} \pi R^3 \frac{B^2}{8\pi}}{6M^2/R}$$

$$\sim \left(\frac{\Phi}{M} \right)^2$$

$$\underline{\underline{\Phi \sim M}}$$

$$\Phi \sim BR^2$$

$$Q = \frac{\mu RT}{\mu}$$

Temp. $\frac{\partial n}{\partial n}$

$$U_{\text{total}} = - \frac{6M^2}{R}$$

$$E = Q + U < 0$$

$$R < \frac{\mu 6M}{RT} \approx \frac{0,1 \mu c}{T} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)$$

$$1. t_{\text{ff}} \approx \frac{1}{\sqrt{g_p}} \quad g = 1$$

$$t_{\text{ff}} = \left(\frac{\mu}{RT} \right)^{3/2} 6M \sim 6 \cdot 10^7 \text{ sec}$$

$$H_2 \quad g_{\text{H}_2} \approx 7 \cdot 10^{-12} \text{ dyn/cm}^2$$

$$\mu_{\text{H}_2} = 13,6 \text{ a.u.} = 22 \cdot 10^{-12} \text{ dyn/cm}^2$$

$$1/2 H_2 \rightarrow q = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ dyn/cm}^2$$

$$\frac{3}{5} \frac{6M^2}{R} \sim qM$$

$$R = \frac{3}{5} \frac{6M}{RT} \approx 80 R_{\odot}$$

$$\langle L \rangle \sim \bar{E} / t_{\text{ff}} \sim \frac{6M^2}{R t_{\text{ff}}} = \frac{q}{6} \left(\frac{RT}{\mu} \right)^{3/2} \approx 2 \cdot 10^{-3} L_{\odot} \left(\frac{T}{\mu} \right)^{3/2}$$

$$\left(\frac{\mu}{RT} \right)^{3/2} \frac{M}{M_{\odot}}$$

$$\left(\frac{\mu}{RT} \right)^{3/2} \frac{M}{M_{\odot}} \left\{ \begin{array}{l} T \sim 10^4 \text{ K} \\ L \sim 10^3 L_{\odot} \end{array} \right.$$

(x2)

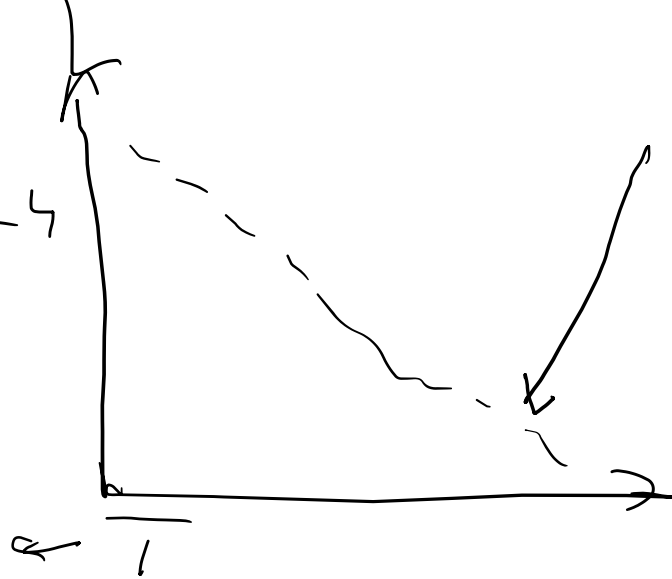
$$\frac{M}{M_{\odot}}$$

$$\left(\frac{T}{\mu} \right)^{3/2}$$

2. Aquas?

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Kohl.



$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\odot}} \right)^4 \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^2 \approx 400 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2$$

$$t = \frac{6 M^2}{R L} \approx \frac{6 M^2}{4\pi R^3 \sigma T^4} = \underline{\underline{8 \cdot 10^7 \text{ s}}} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ res}$$