

Минимальные условия существования атмосферы вокруг протопланеты

(64)

$$N_e > \zeta$$

$$\frac{2GM_p}{R_p} > \zeta^2$$

$$R_p < \frac{2GM_p}{\zeta^2} = 2R_s - \text{разные значения (боны).}$$

$$\frac{2GM_p}{\zeta^2} = \frac{2GM_p}{GM_* \delta^2} = \frac{2\rho_m}{\rho_*} \frac{R_p^3}{R_*^3} \cdot 25^{-2} > R_p$$

$$R_p \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\delta^3}{2} \frac{\rho_*}{\rho_m} R_*^3 \right)^{1/2} = \frac{R_*}{\sqrt{2}} \delta \left(\frac{\rho_*}{\rho_m} \right)^{1/2} \left(\frac{R_*}{2} \right)^{1/2} \quad (*)$$

$$R_p > \frac{7 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1}}{\sqrt{2}} = \frac{35 \cdot 10^7 \text{ см}}{\sqrt{2}} = \frac{3.5 \cdot 10^8 \text{ см}}{\sqrt{2}} \approx 2000 \text{ км}$$

на $2 \approx 1 \text{ а.е.}$

на $2 \approx 5 \text{ а.е.}$ - тогда $R_p > 1000 \text{ км.}$

$$R_p > R_p^{\min} \sim 2^{-1/2} \rightarrow M_p > M_p^{\min} \sim 2^{-3/2} \text{ а } M_{iso} \sim 2 \text{ см. оп } 55 (*)$$

на 1 а.е. $M_{iso} \sim M_p^{\min}$, внутри меньше, снаружи - больше.



$$2R = 2u ?$$

$$\frac{\rho_m}{\rho_*} \frac{R_p^3}{R_*^3} 25^{-2} = \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^{1/3} 2 = \left(\frac{\rho_m}{\rho_*} \right)^{1/3} \frac{R_p}{R_*}$$

$$R_p = R_* \delta \left(\frac{\rho_*}{\rho_m} \right)^{2/3} \quad (*)$$

т.е. $\sim \text{const.}$ в зависимости от $\delta < 0.05$.
 $\sim 200 M_{\oplus}$

Масса изотермической атмосферы.

Пусть $M_{env} = \int (M_p + M_{env}) = \int M_{tot} \cdot 4\pi r^2 dr$.

$\frac{dP}{dr} = - \frac{GM_p}{r^2} \rho$ - упрощения.

$T = const: \rho = \rho_0 e^{-\frac{z}{h}}$.

$\frac{c_s^2}{\rho} \frac{d\rho}{dr} = - \frac{GM_p}{r^2}$

$\ln \rho = \frac{GM_p}{c_s^2} \frac{1}{r} + C = \frac{z_g}{2} + C$.

$\rho|_{z_g} = \rho_0$, где ρ_0 - средняя плотность газа в ядре: $\rho_0 \approx \frac{\Sigma}{h}$.

$\ln \rho_0 = 1 + C \rightarrow -C = 1 - \ln \rho_0$.

$\ln \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{z_g}{2} - 1$

$\rho = \rho_0 e^{\frac{z_g}{2} - 1}$



Все масса атм - в слое поверхности.

$z \approx R_p + h$

$\rho = \rho_0 e^{\frac{z_g}{2} - 1} = \rho_0 e^{\frac{z_g}{2} (1 - \frac{h}{R_p}) - 1} = \rho_0 e^{\frac{z_g}{2} - 1} e^{-\frac{z_g h}{2 R_p^2}}$.

т.о. $h_{atm} = \frac{R_p^2}{z_g}$ (*)

$M_{env} \approx 4\pi R_p^2 \cdot h_{atm} \cdot \rho(R_p) = 4\pi R_p^4 z_g^{-1} \cdot \frac{\Sigma}{h} e^{\frac{z_g}{2} - 1}$

$$M_{env} \geq \varepsilon M_p$$

~~4 R_p^4 \rho_0^{-1} e^{v_3/R_p - 1} > \varepsilon \rho_m \frac{4}{3} R_p^3~~

$$v_3/R_p \equiv x.$$

$$x^{-1} e^x > \frac{\varepsilon}{3e} \frac{\rho_m}{\rho_0}$$

$$x - \ln x > \ln\left(\frac{\varepsilon}{3e} \frac{\rho_m}{\rho_0}\right) \Rightarrow$$

bottomly lower "ln x". ↙ you use other method eq. 1.

$$\frac{v_3}{R_p} \geq \ln\left(\frac{\varepsilon}{3e} \frac{\rho_m}{\rho_0}\right)$$

$$\frac{v_3}{R_p} = / \text{eq. (*)} \text{ eq 64} / = \frac{\rho_m}{\rho_*} \frac{R_p^3}{R_*^2} \frac{2}{R_*} \delta^{-2} \geq \ln(-).$$

$$R_p \geq \left(\frac{\rho_*}{\rho_m}\right)^{1/2} \left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{3e} \frac{\rho_m}{\rho_0}\right)\right]^{1/2} \left(\frac{R_*}{2}\right)^{1/2} \delta R_*$$

 (*)

$$\text{T.e. } R_p \geq \left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{3e} \frac{\rho_m}{\rho_0}\right)\right]^{1/2} R_p^{\text{min}} \quad (\text{eq. eq 64 (*)}).$$

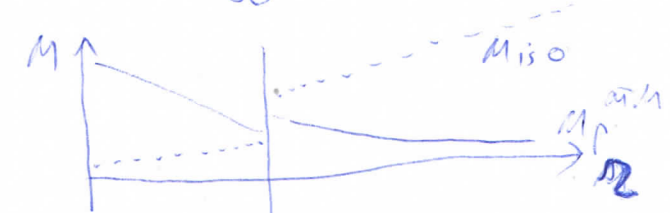
$$\text{где } \rho_0 = 10^{-9} \text{ g/cm}^3 \text{ на 1 a.e., } \varepsilon \sim 0.1 \rightarrow R_p \geq 4 R_p^{\text{min}} \approx 8000 \text{ km}$$

$$M_p > M_{\oplus}$$

 т.е. $\Rightarrow M_{iso} (1 \text{ a.e.})$

$$\text{Зато на 5 a.e. } R_p \geq 4 R_p^{\text{min}} \approx 4000 \text{ km} < M_{iso} (5 \text{ a.e.}).$$

Результат - астероид не превратится в планету.



Критическая масса обложки ядра.

$$\begin{cases} \frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \rho & (1) \\ \rho = \frac{k}{\mu m_H} \rho_T & (4) \\ \frac{dP}{dr} = - \frac{GM}{r^2} \rho & (2) \\ L = \text{const} = \frac{GM_p \dot{M}_p}{R_p} & (5) \end{cases}$$

- закон сохранения энергии.

$$\frac{dT}{dr} = - \frac{3\kappa_R \rho}{16\sigma T^3} \frac{L}{4\pi r^2} \quad (3) \quad F = \frac{L}{4\pi r^2} = - \frac{c}{3\kappa_R \rho} \frac{d}{dr} \left(\frac{4\sigma}{c} T^4 \right)$$

$\kappa_R = \text{const.}$



радиативный перенос, излучение из, проходящее
на поверхности диссипирует только уже при столкнове-
нии с протопланетой.



Задача: найти $\rho(r)$.

$$\frac{(3)}{(2)} = \frac{dT}{dP} = \frac{3\kappa_R L}{64\pi\sigma G M + 3}$$

$$\int_{T_0}^{T_*} T^3 dT = \frac{3\kappa_R L}{64\pi\sigma G M_{tot}} \int_{P_0}^{P_*} dP \rightarrow T_*^4 \approx \frac{3}{16\sigma} \frac{\kappa_R L}{6 G M_{tot}} \rho$$

$T_0 \ll T_*, P_0 \ll P_*$. / Подставим (4) сюда $\rightarrow$

$$T_*^3 = \frac{3}{16\sigma} \frac{k}{\mu m_H} \frac{\kappa_R L}{6 G M_{tot}} \rho. \quad \text{Подставим это в выраб(3)} \rightarrow$$

$$dT = - \frac{3\kappa_R \rho L}{16\sigma \cdot 4\pi r^2} \frac{\mu m_H 6 G M_{tot} \cdot 16\sigma}{3 k \kappa_R L \rho} = - \frac{\mu m_H}{4k} \frac{G M_{tot}}{r^2} dr \rightarrow$$

$$T = \frac{\mu m_H}{k} \frac{G M_{tot}}{4r} \quad !$$

отсюда $\rho(r)$:

$$\rho = \frac{16\sigma}{3} \frac{\mu_{\text{H}}}{k} \frac{\sigma G M_{\text{tot}}}{2R_L} \left(\frac{\mu_{\text{H}}}{k} \frac{G M_{\text{tot}}}{4R} \right)^3 = \frac{64\sigma^2}{32R_L} \left(\frac{\mu_{\text{H}}}{k} \frac{G M_{\text{tot}}}{4} \right)^4 \frac{1}{2^3} \quad (*)$$

$$M_{\text{env}} = \int_{R_p}^{R_g} 4\pi \rho r^2 dr = \frac{256\sigma^2}{32R_L} \left(\frac{\mu_{\text{H}} G M_{\text{tot}}}{4k} \right)^4 \ln \left(\frac{R_g}{R_p} \right) \quad (*)$$

$R_p = f(M_p)$; $R_g = f(M_{\text{tot}})$, но не заданы.

~~Или~~

$$M_p = M_{\text{tot}} - M_{\text{env}}$$

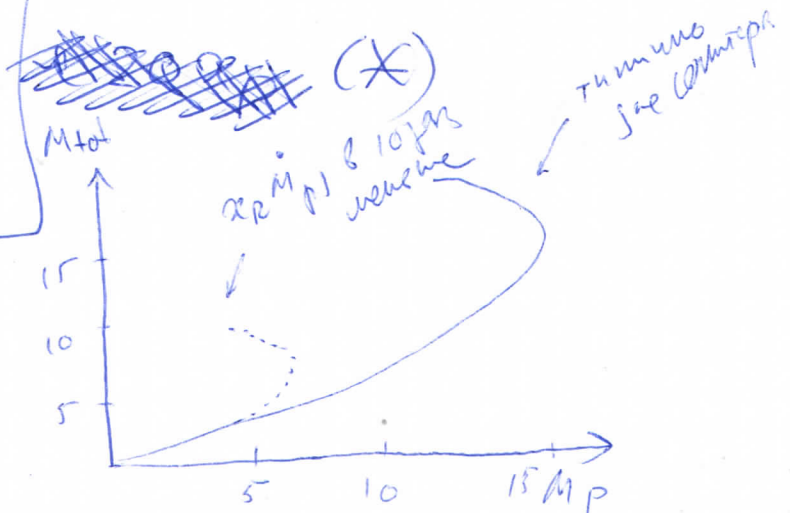
$$\text{Тогда } M_p = M_{\text{tot}} - \left(\frac{C}{2R_L \dot{M}_p} \right) \frac{M_{\text{tot}}^4}{M_p^{2/3}} \quad (*)$$

Э найдем M_p !

Его находим из условия $\frac{dM_p}{dM_{\text{tot}}} = 0$:

$$M_{\text{tot}} = \left(\frac{4C}{2R_L \dot{M}_p} \right)^{3/4} M_p^{2/3}$$

$$M_p = 0.4 \left(\frac{2R_L \dot{M}_p}{C} \right)^{3/4} \quad (*)$$



Характерное время взрывающегося тела.

Если $z_g < z_H$, то это - анарежные бонны.

$$\dot{M}_{tot} = 4\pi z_g^2 \rho \dot{\xi} = 4\pi \frac{G^2 M_{tot}^2}{\xi^4} \dot{\xi} \cdot \frac{\Sigma}{h} = 4\pi \frac{G^2 M_{tot}^2}{\xi^4} \frac{\Sigma \Omega}{\xi} = \frac{4\pi \Sigma \Omega G^2 M_{tot}^2}{\xi^4}$$

$$\tau_m = \left(\frac{1}{\Omega} \frac{\dot{M}_{tot}}{M_{tot}} \right)^{-1} = \frac{\xi^4}{4\pi \Sigma G^2 M_{tot}} \quad (*)$$

$\tau_m \sim M_{tot}^{-1}$ - взрывающийся объект.

$$\tau_m \sim \frac{(10^5)^4}{12 \cdot 10^3 \cdot 6.5^2 \cdot (10^{-8})^2 \cdot 10^{29}} = \frac{1}{4} \cdot 10^{-2} \cdot 10^4 \approx 25!$$

на 5 а.р. $\sim 10^2 - 10^3$ лет.



не совсем ясно, считать надо в гравитационной формуле, т.е. после начале этого стада (обособленные оболочки)

$z_g \approx z_H > h$ (см. оценку на стр. 64):

$$\dot{M}_{tot} = \rho \cdot h \cdot z_H (\Omega z_H) = \Sigma \Omega z_H^2 = \Sigma \Omega z_H^2 \left(\frac{M_{tot}}{M_x} \right)^{2/3}$$

$$\tau_m = \frac{M_x^{2/3} M_{tot}^{4/3}}{\Omega^2 \Sigma} \quad (*)$$

$$\tau_m = \frac{10^{33-2/3} \cdot 10^{28/3}}{1.5^2 \cdot 10^{13-2} \cdot 10^3} = \frac{10^{32}}{3 \cdot 10^{29}} = 3 \cdot 10^2 = 300$$

на 5 а.р. $\sim 10^3 - 10^4$ лет (темн анарежен $> 10^{-2}$ МО/год!) сравните с $\dot{M}$ на злеппу.

Формирование плазмы - ионов.

рав. ионизованности гала.

$$Q = \frac{c_s \Omega}{\Phi G \Sigma} < Q_{cr}$$

$$\Sigma > \frac{c_s \Omega}{\Phi G Q_{cr}} = \frac{\delta \Omega^2 r}{\Phi G Q_{cr}} = \Sigma_0 \left(\frac{Q_{cr}}{1.5} \right)^{-1} \left(\frac{\delta}{0.05} \right) \left(\frac{r}{5 \text{ a.u.}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{-2}$$

$$\Sigma_0 = \frac{0.05 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot 12^{-1}}{0.109} \right)^2 \cdot 5 \cdot 1.5 \cdot 10^{13}}{0.65 \cdot 10^{-8} \cdot 1.5} \quad (*) \rightarrow 4 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2}$$

Мноо! Только самые ранние стадии эв. гала.

~~Мноо!~~

Оценке гравитационной массы: (см. мотор 42) $\downarrow$

$$L = \frac{2\pi}{k_{min}} = \frac{2c_s^2}{G\Sigma} : M_p = \Phi \Sigma^2 \Sigma$$

$$\text{Для } \delta = 0.05; Q_{cr} = 1.5 \Rightarrow M_p = 8 M_J \quad (*)$$

~~Мноо!~~

Далее, см. стр (14) : $t_{cool} = \frac{4}{9H^{-1} f \delta \Sigma} \rightarrow 1/2$ - за счет гравитации

$\rightarrow$ сильнейшие гравитационные, а не стат. отбросы момен- та за счет рав. ионизованности, излучения γ $L > 0.1$

(Gammie, 2001). Скорб $t_{cool} / t = 2 / \pm 3 \Omega^{-1} \quad (*)$

Оценке t_{cool} в этой толстой гала?

~~Мноо!~~ не оброте.

Поверхностная п-тб энергии в слое:

$$U = \int (j-1)^{-1} \rho \, dz = (j-1)^{-1} \sum \epsilon^2$$

$$\frac{dU}{dz} = 2\sigma T_d^4 \quad \frac{T_c^4}{T_d^4} = \tau$$

$$t_{\text{cool}} = \frac{(j-1)^{-1} \sum \epsilon^2}{2\sigma T_d^4} = (j-1)^{-1} \sum \frac{j k T_c \tau}{\mu_{\text{MH}} \cdot 2\sigma T_c^4} =$$

$$= (j-1)^{-1} \sum \left(\epsilon^2 \frac{\mu_{\text{MH}}}{j k} \right)^{-3} \frac{j k}{\mu_{\text{MH}}} \frac{\tau}{2\sigma} =$$

$$= \left(\frac{j k}{\mu_{\text{MH}}} \right)^4 \frac{\tau}{(j-1) 2\sigma} \frac{\sum}{\delta^3 (\Omega \Omega)^3} \quad (*) \quad \text{Также лучше не оп (3), но в упр. } T_d = T_c.$$

Для $\Sigma(1)$, гамма не одороге: $|\delta| \approx 0.05$

)**

$$t_{\text{cool}} \Omega = 10 \tau \left(\frac{2}{5 \text{ a.e.}} \right)^{3.5}$$

← проверить степень!!!
(не совпадает с формулой)

1) Для $\tau \gg 1$ фрагментарное излучение.

2) Означает $T_c \downarrow$ не непрерывно $\rightarrow \tau \sim 1$ и не гравитационное расстояние $\sim 20-50 \text{ a.e.}$ возможно образование парней-матров $m > \mu_j$.

