ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ЗВЕЗДАХ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Р.М. Джилкибаев

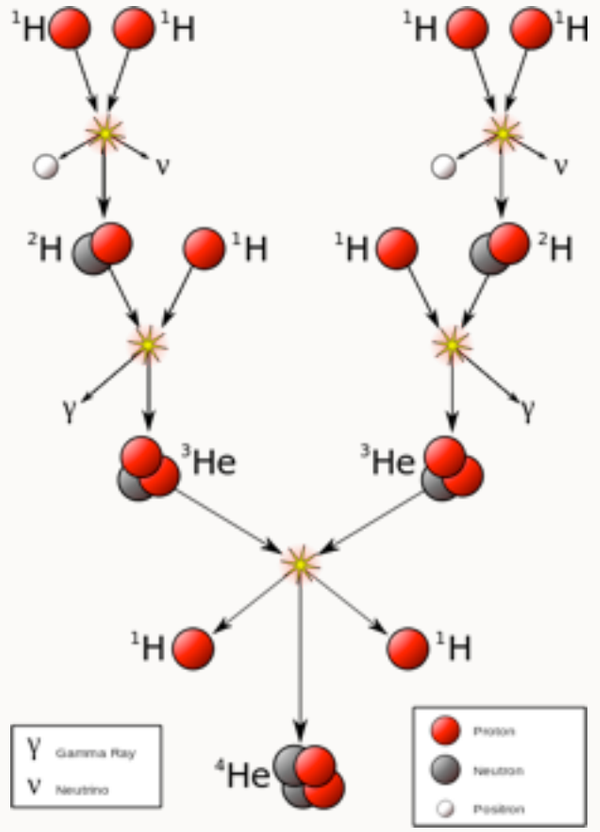
ПРОТОЗВЕЗДЫ

- $H^2 + H^2 \rightarrow H^3 + n + 3.27$ MeV ($T \sim 10^6$ K)
- $p + p \rightarrow H^2 + e^+ + \nu + 0.42$ MeV ($T \sim 10^7$ K)
- $T \sim 10^7$ K, $T \sim 1$ keV
- примесь $D/p \sim 10^{-4}$

$$p + p \rightarrow {}^2\mathrm{H} + e^+ + \nu_e + 0.42\,\text{МэВ},$$
$$p + p \rightarrow {}^2\mathrm{H} + e^+ + \nu_e + 0.42\,\text{МэВ},$$
$$p + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma + 5.49\,\text{МэВ},$$
$$p + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma + 5.49\,\text{МэВ},$$
$${}^3\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + p + p + 12.86\,\text{МэВ}$$

или в более компактном виде (суммируя все реакции)

$$6p \rightarrow {}^4\mathrm{He} + 2p + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma + 24.68\,\text{МэВ}.$$



УГЛЕРОДНЫЙ ЦИКЛ

$$^{12}_{6}\mathrm{C} + p \to {}^{13}_{7}\mathrm{N} + \gamma + 1.94\,\text{МэВ},$$
$$^{13}_{7}\mathrm{N} \to {}^{13}_{6}\mathrm{C} + e^{+} + \nu_e + 1.20\,\text{МэВ}$$
$$^{13}_{6}\mathrm{C} + p \to {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \gamma + 7.55\,\text{МэВ},$$
$$^{14}_{7}\mathrm{N} + p \to {}^{15}_{8}\mathrm{O} + \gamma + 7.30\,\text{МэВ},$$
$$^{15}_{8}\mathrm{O} \to {}^{15}_{7}\mathrm{N} + e^{+} + \nu_e + 1.73\,\text{МэВ}$$
$$^{15}_{7}\mathrm{N} + p \to {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 4.97\,\text{МэВ}$$

- Эволюция массивной звезды

$$^{4}\mathrm{He} + {}^{12}\mathrm{C} \to {}^{16}\mathrm{O} + \gamma + 7.16\,\text{МэВ}$$

$$^{12}\mathrm{C} \xrightarrow{\alpha} {}^{16}\mathrm{O} \xrightarrow{\alpha} {}^{20}\mathrm{Ne} \xrightarrow{\alpha} {}^{24}\mathrm{Mg} \xrightarrow{\alpha} {}^{28}\mathrm{Si}$$

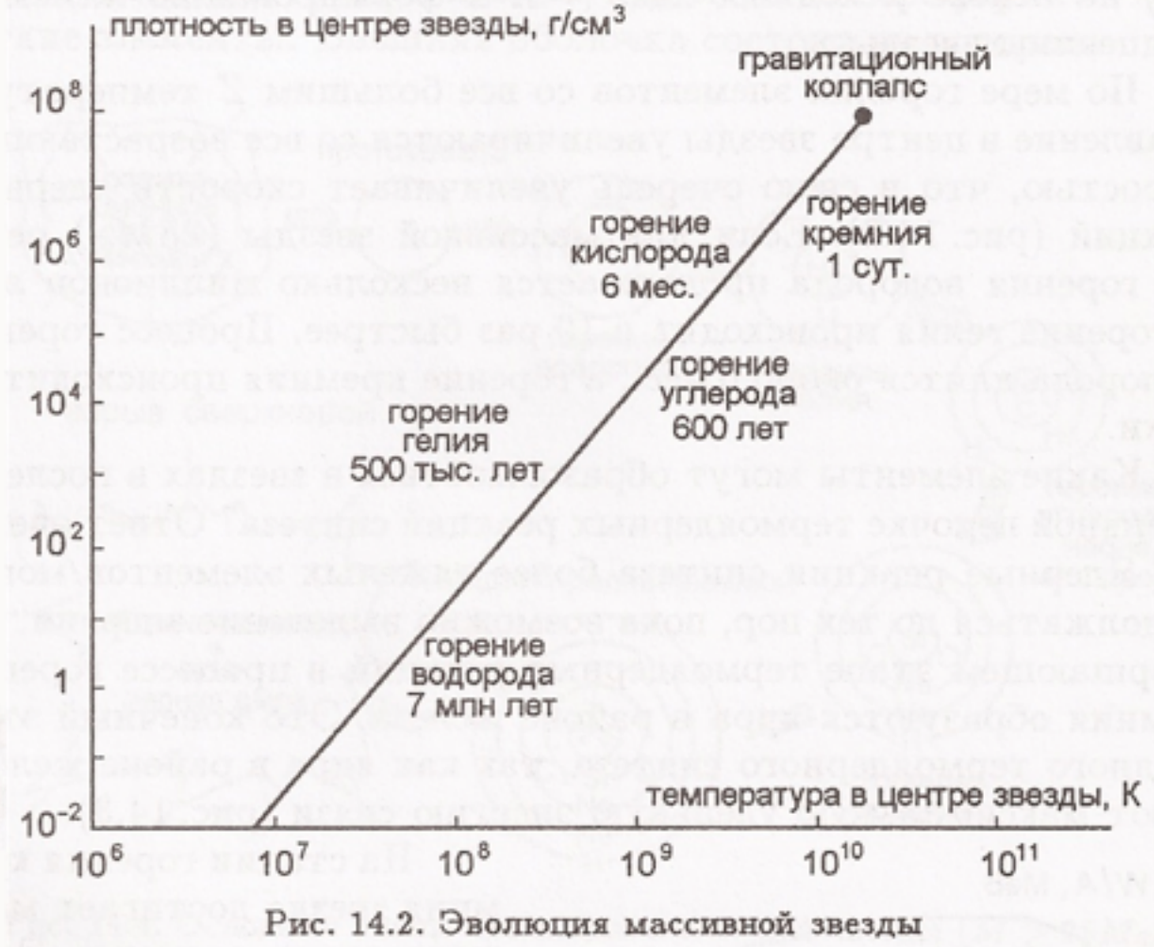
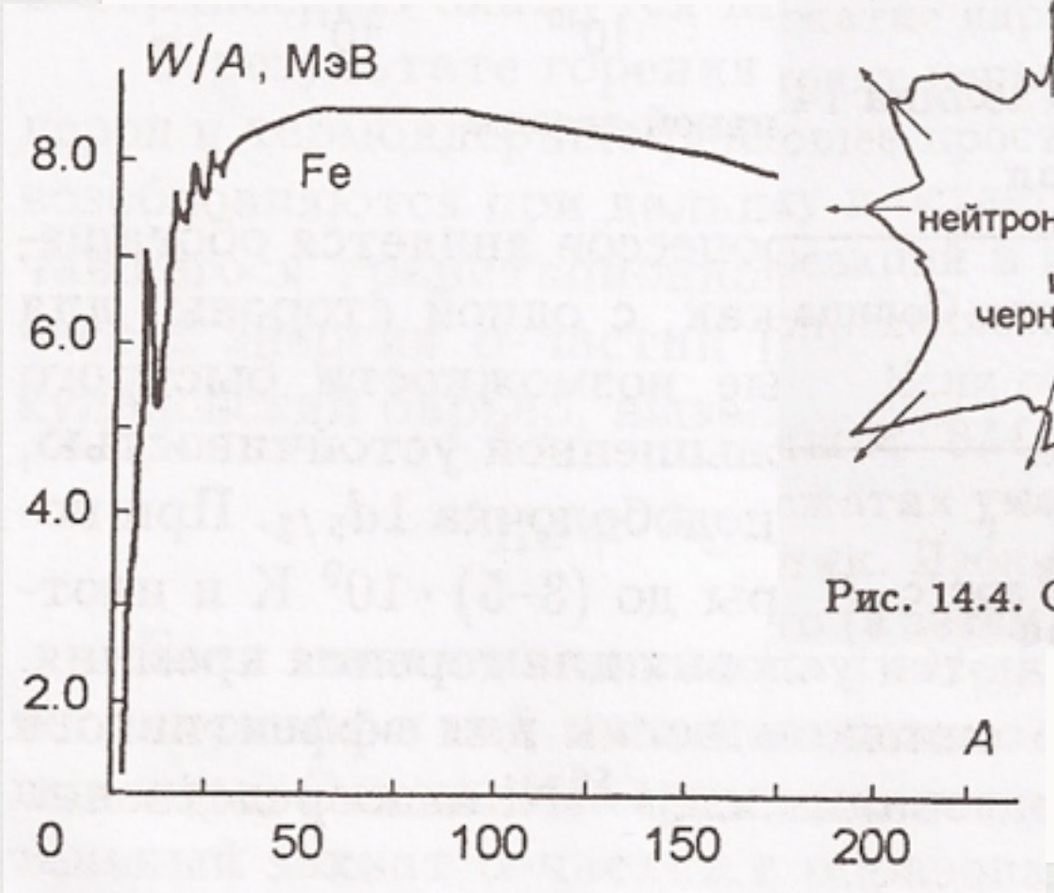


Рис. 14.2. Эволюция массивной звезды

ЭВОЛЮЦИЯ МАССИВНОЙ ЗВЕЗДЫ



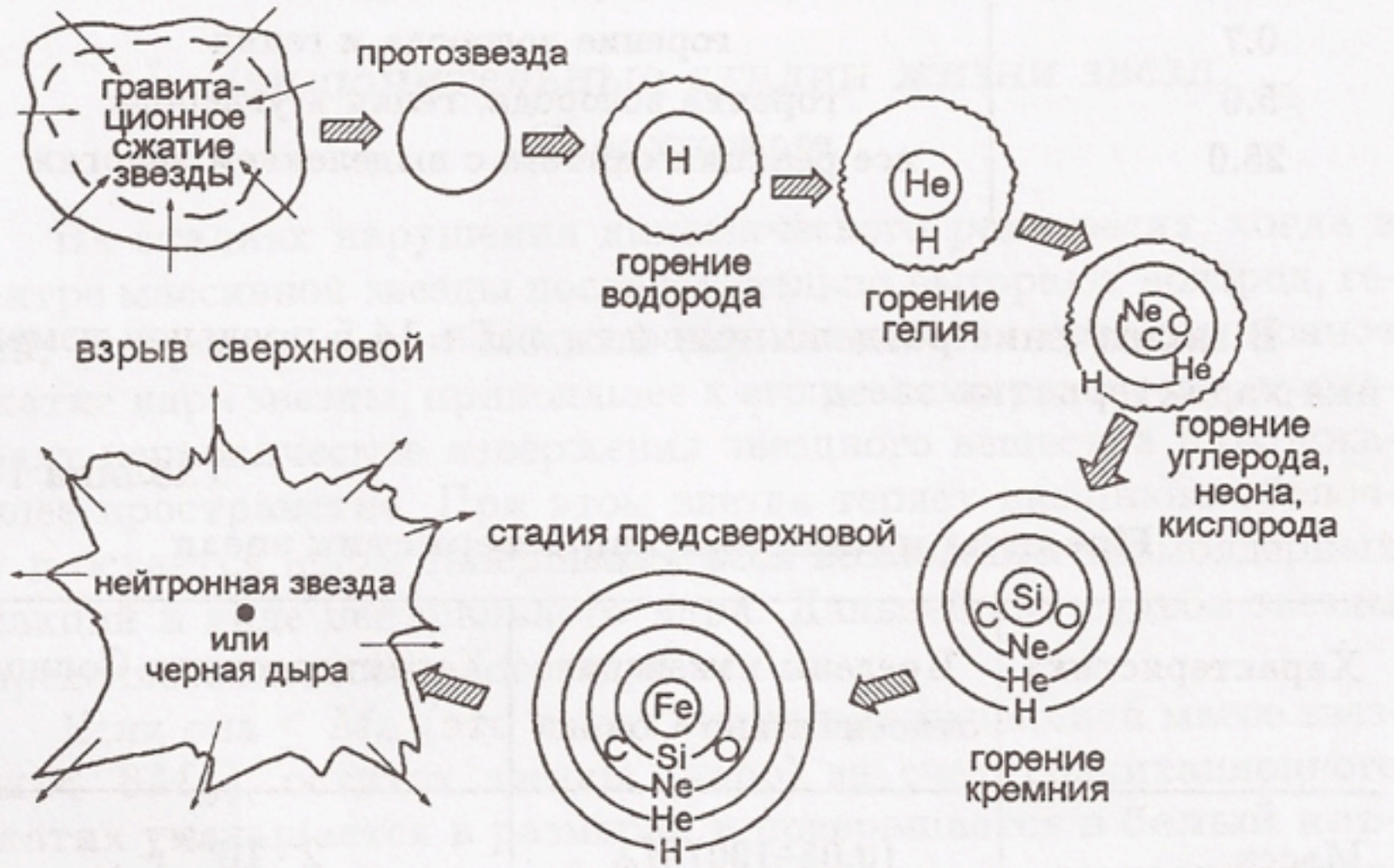


Рис. 14.4. Основные этапы эволюции массивной звезды ($M > 25M_\odot$)

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

- p - 87 %
- He - 12 %
- e^- - 2 %
- e^+ - 0.2 %
- p^- - 0.008 %
- $N(E) = N_0 E^{-n}$, $n = 2.7$, $E < 10^{15}$
- $n = 3.0$, $E > 10^{15}$ eV

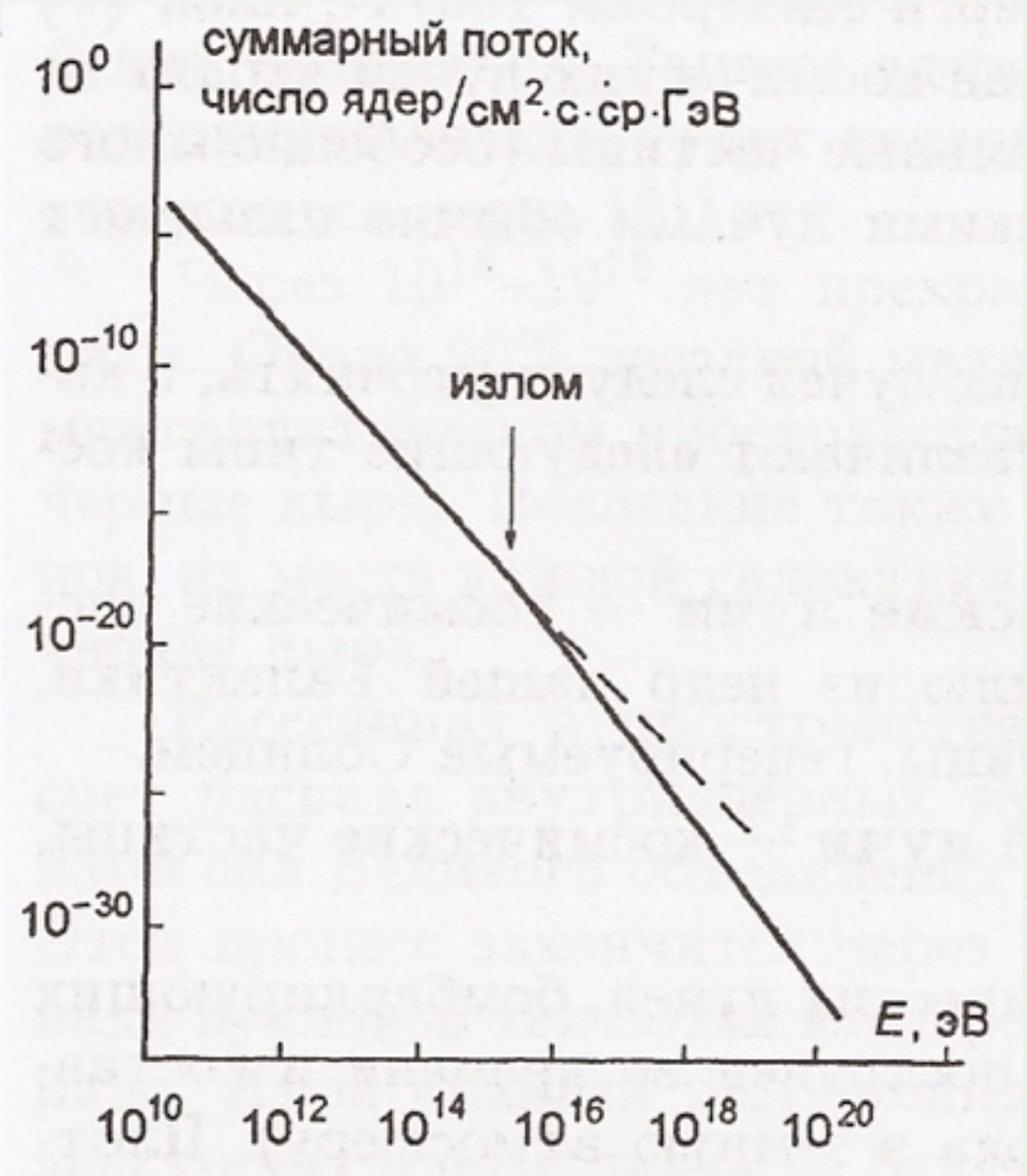
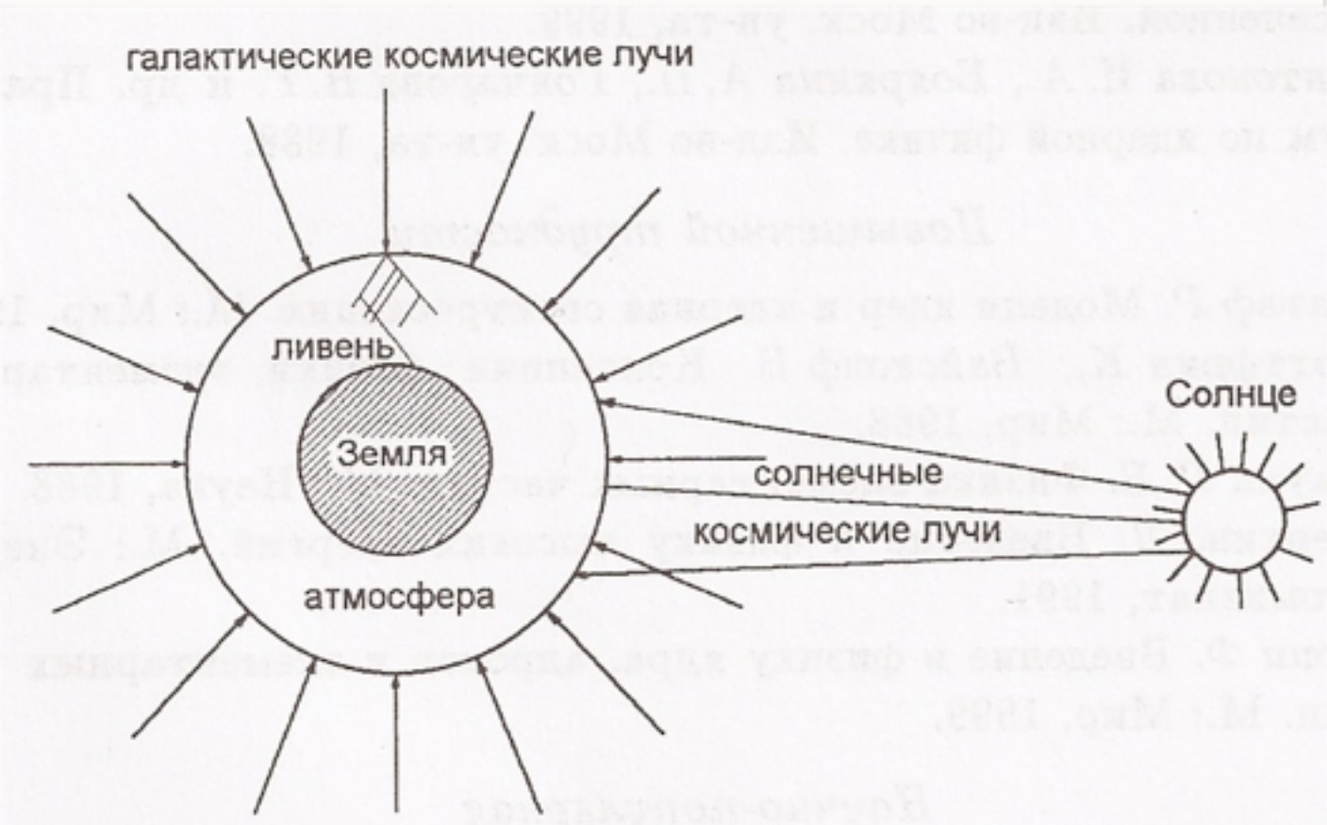


Рис. 15.6. Энергетический спектр ядерной компоненты космических лучей

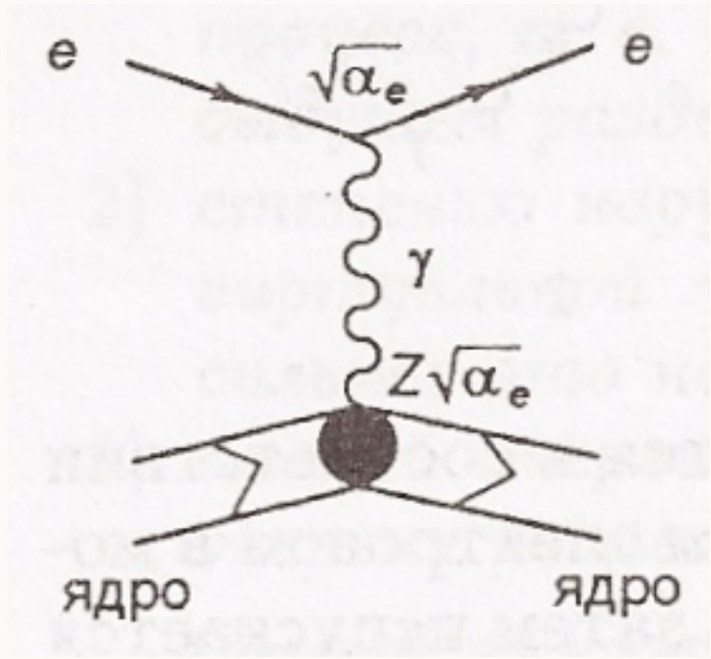
КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

- Толщина атмосферы - 1000 г/см^2
- p (nucl. length) - 100г/см^2
- ШАЛ ~ 10 км^2
- p -> π -> μ
- $\mu \sim 10^{-2}$ /см^2/ст/с



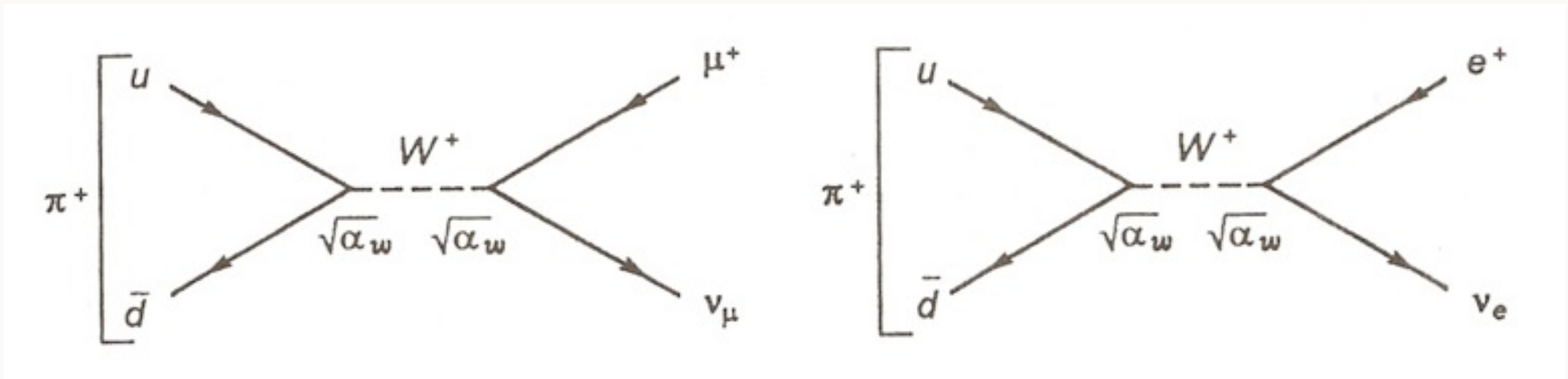
ЗАКОН КУЛОНА

- Обмен фотоном $f = \Delta p / \Delta t,\ \Delta t = r / c,\ \Delta p * r \approx h$
- $f = h / r\ /\ r / c = hc / r^2$
- $\alpha = e^2 / hc$
- $F = Z_1\ \alpha^{1/2}\ Z_2\ \alpha^{1/2}\ f = Z_1\ Z_2\ e^2 / r^2$

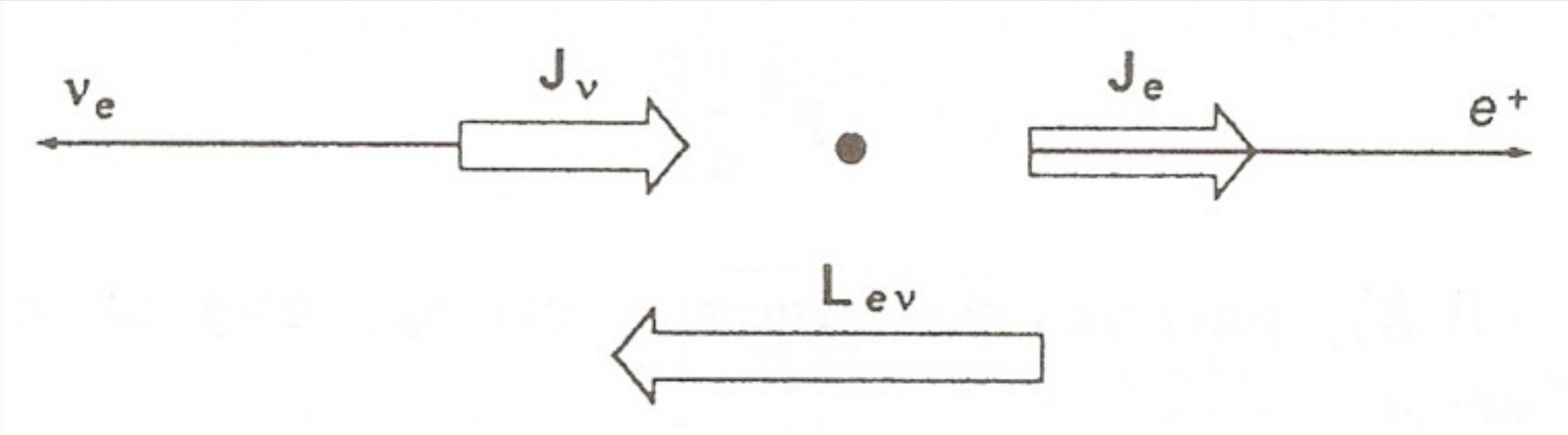


РАСПАД ПИОНА

- $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$, $\pi^- \to \mu^- + \tilde{}\nu_\mu$, $Q = 34$ MeV
- $\pi^+ \to e^+ + \nu_e$, $\pi^- \to e^- + \tilde{}\nu_e$, $Q = 140$ MeV - под. в 10^4 раз



РАСПАД ПИОНА



- $L_{e\nu}\, h < p\, R_w$, $R_w \sim 10^{-3}$ fm, $hc = 197$ MeV fm
- $L_{e\nu} < 70$ MeV 10^{-3} fm $/200$ MeV fm $= 3\ 10^{-4}$
- $L_{e\nu} = 0$

РАСПАД ПИОНА

- $E_\mu = (m_\pi^2 + m_\mu^2)/2m_\pi$, $p_\mu = p_\nu = (m_\pi^2 - m_\mu^2)/2m_\pi$
- $E_e = (m_\pi^2 + m_e^2)/2m_\pi$, $p_e = p_\nu = (m_\pi^2 - m_e^2)/2m_\pi$
- $\varrho \sim p^2\, dp/dE_t = pE$, $\quad E_e + p_e = m_\pi$, $pdp = EdE$
- $w_e \sim \varrho\,(1 - \beta_e) \sim \varrho\,(1 - p_e/E_e) \sim (m_\pi^2 - m_e^2)^2\ m_e^2$
- $w_\mu \sim \varrho\,(1 - \beta_\mu) \sim \varrho\,(1 - p_\mu/E_\mu) \sim (m_\pi^2 - m_\mu^2)^2\ m_\mu^2$
- $(m_\pi^2 - m_e^2)^2 / (m_\pi^2 - m_\mu^2)^2 = 5.4$
- $(1 - \beta_e)/(1 - \beta_\mu) = (m_e/m_\mu)^2 = 3.7 \times 10^{-5}$; $Br(e/\mu) = 1.3 \times 10^{-4}$