

**Волновые и кинетические процессы
в релятивистской плазме
Лекция 9**

Е.В. Деришев

Институт прикладной физики РАН

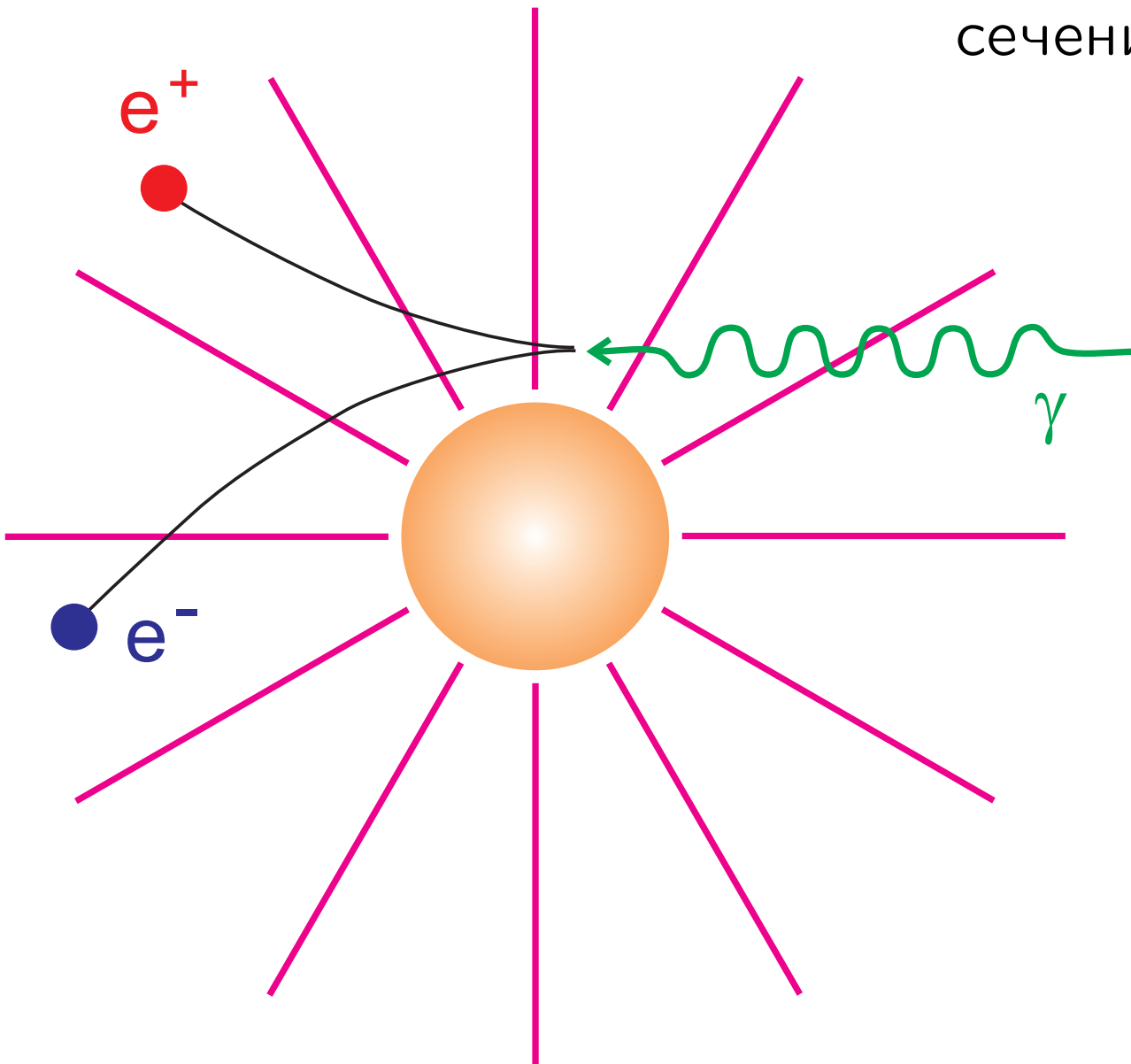
Фоторождение электрон-позитронных пар

Максимальное транспортное сечение при $\varepsilon_\gamma \sim 3 m_e c^2$

$$\sigma_{tr}^{max} \simeq 5 \times 10^{-27} \text{ см}^2$$

Релятивистский предел $\varepsilon_\gamma \gg m_e c^2$

$$\sigma_{tr} \propto \varepsilon_\gamma^{-2}$$



Кварки и адроны

Три поколения кварков

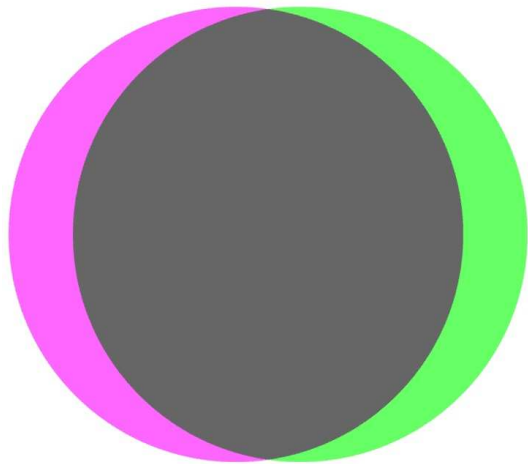
$(d, u), (s, c), (b, t)$

Заряды

$$Q_d = Q_s = Q_b = -\frac{1}{3}e \quad Q_u = Q_c = Q_t = +\frac{2}{3}e$$

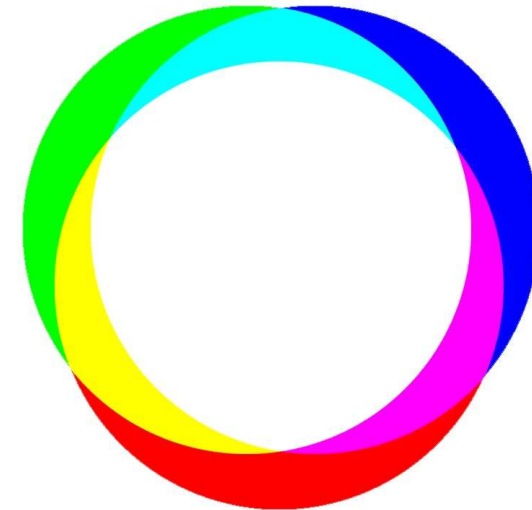
Массы

$$m_d \simeq m_u \simeq 0 \quad m_s \simeq 100 \text{ МэВ}/c^2$$



МЕЗОНЫ

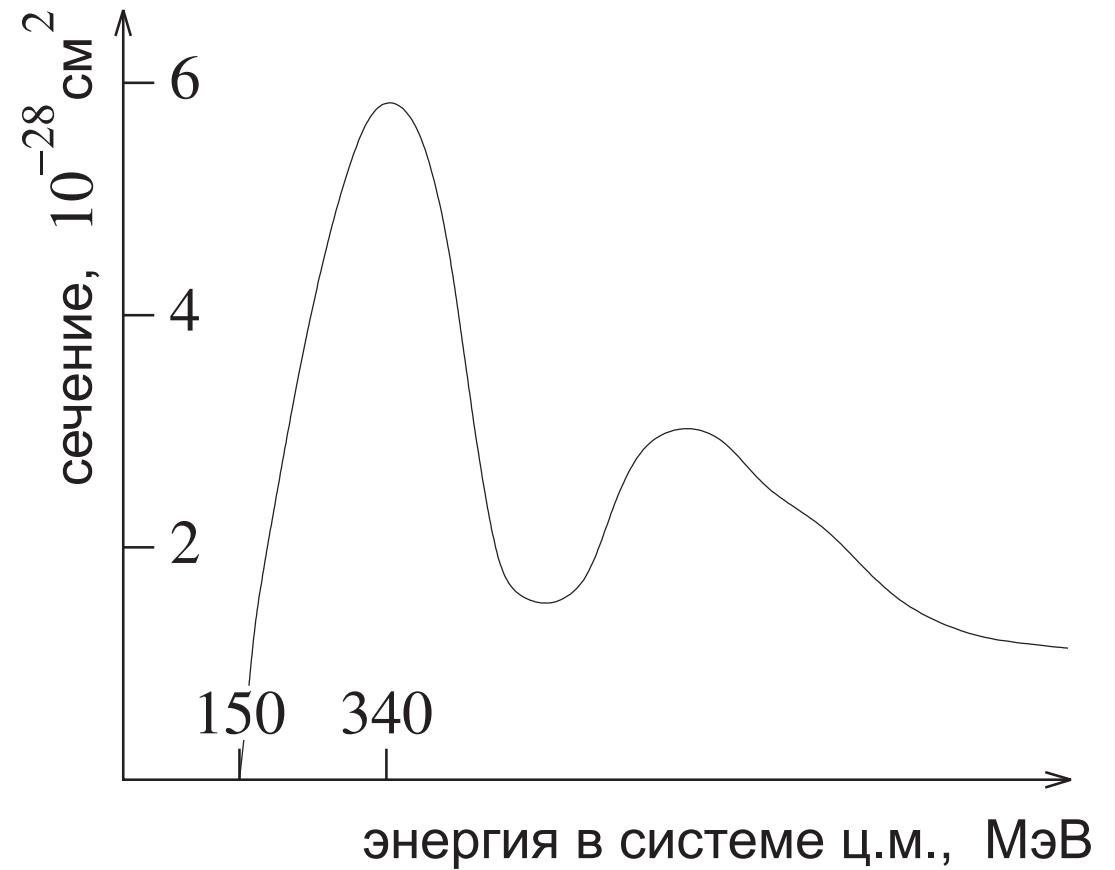
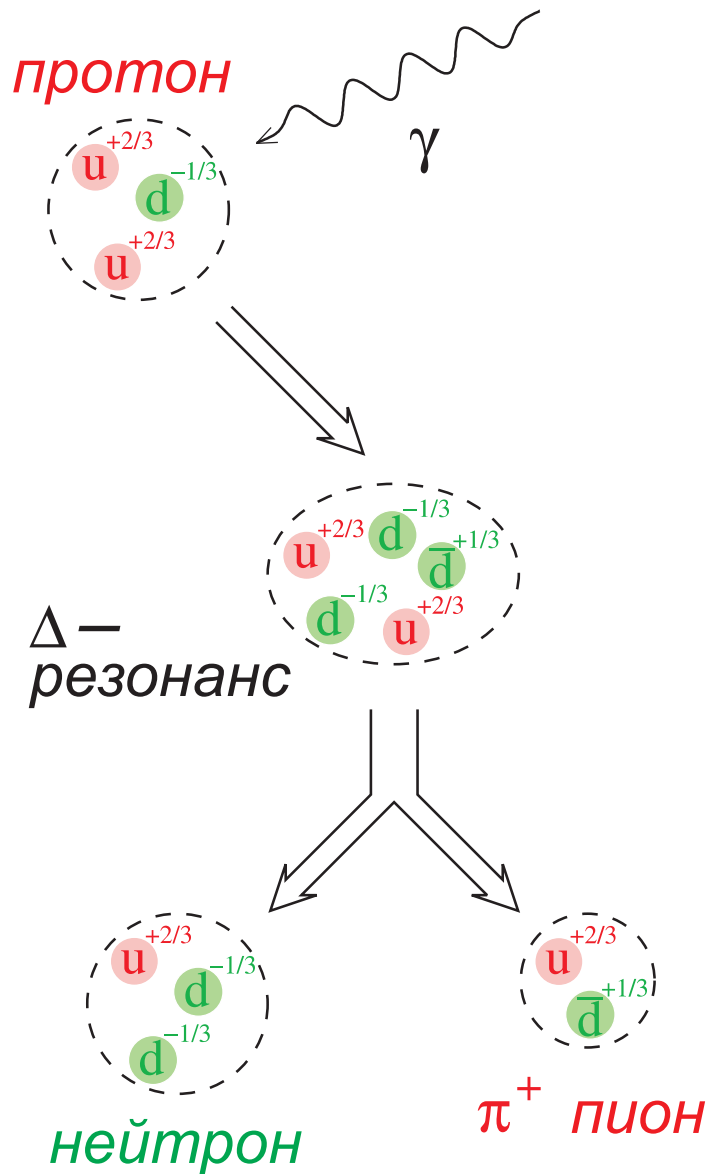
ПИОНЫ π^-, π^+, π_0



БАРИОНЫ

ПРОТОН И НЕЙТРОН

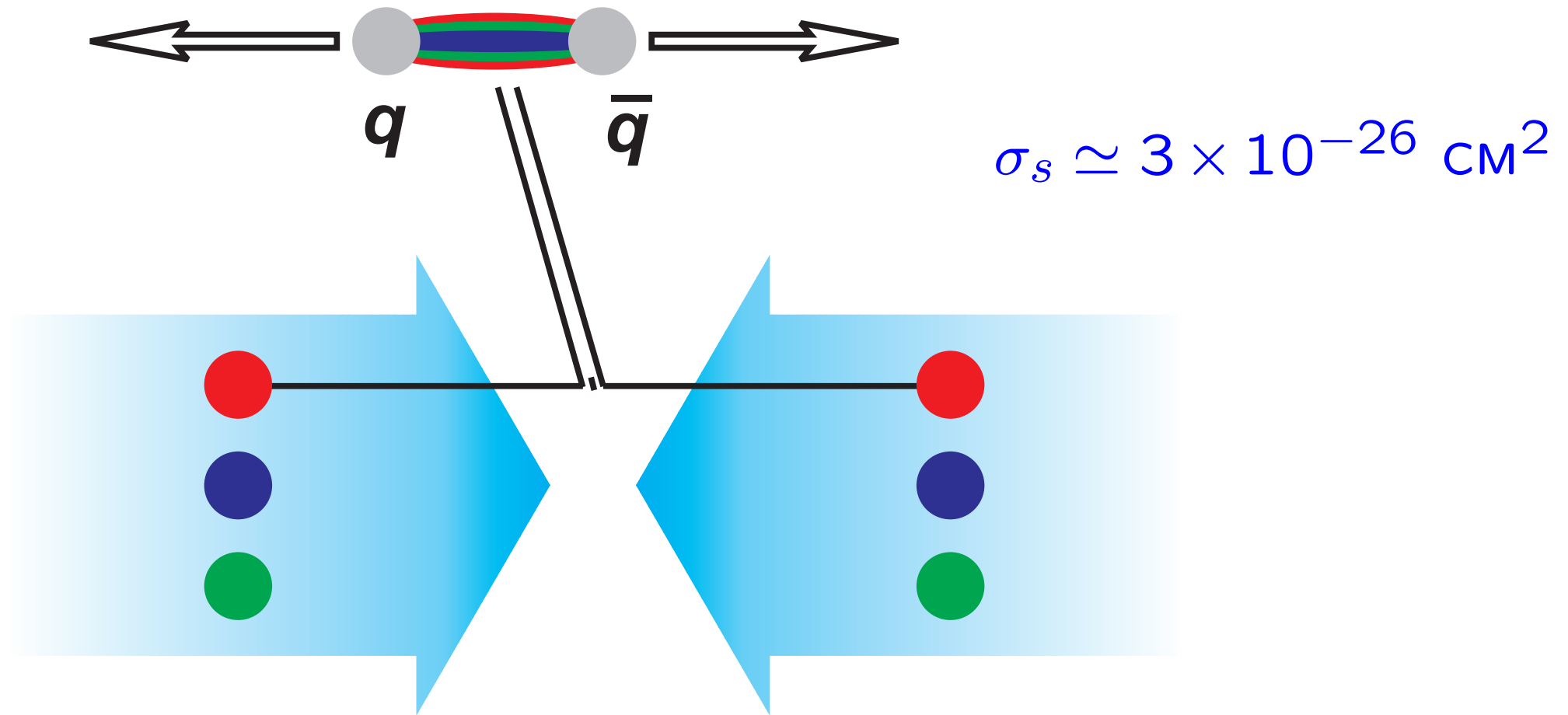
Фоторождение пионов



$$\Delta \rightarrow N + \pi_0 \quad (\text{вероятность } 2/3)$$

$$\Delta \rightarrow N + \pi^\pm \quad (\text{вероятность } 1/3)$$

Столкновения релятивистских нуклонов



Сечение незначительно растёт с увеличением энергии

Количество фрагментов растёт как $(\epsilon_{с.о.т.})^x$

Распады пионов

- Нейтральные пионы

$$\pi_0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad \tau = 8 \times 10^{-17} \text{ с} \quad \varepsilon_\gamma = 67.5 \text{ МэВ}$$

- Заряженные пионы

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \quad \tau_\pi = 2.6 \times 10^{-8} \text{ с} \quad \varepsilon_\nu = 30 \text{ МэВ}$$
$$\varepsilon_\mu = 4 \text{ МэВ}$$

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_\mu + \nu_e \quad \tau_\mu = 2.2 \times 10^{-6} \text{ с} \quad \varepsilon_\nu, \varepsilon_e \simeq 35 \text{ МэВ}$$

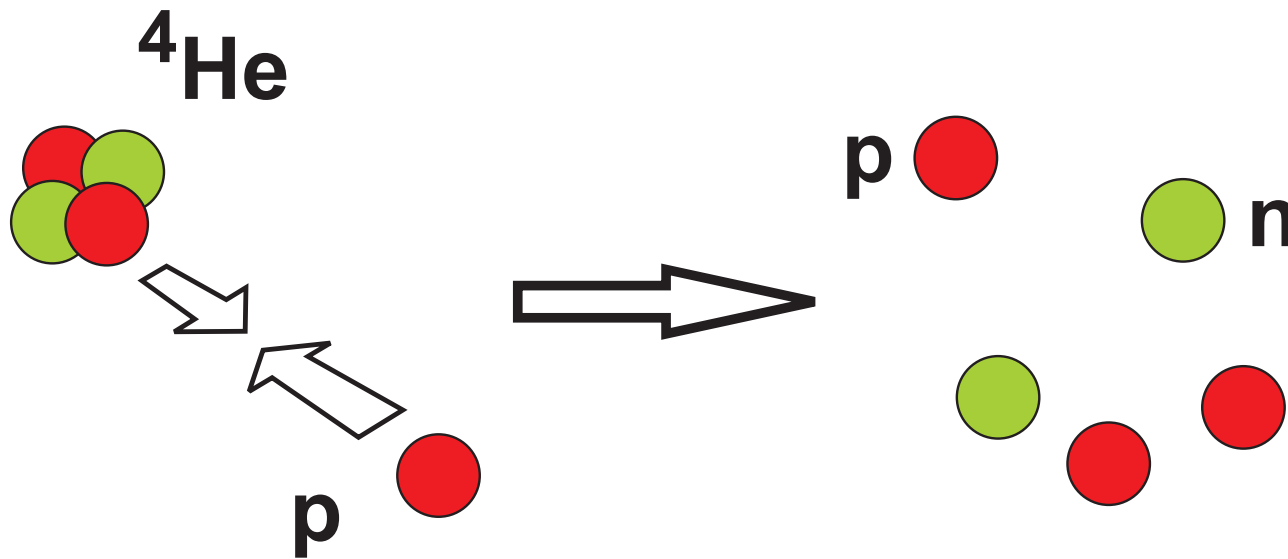
Если плотность нуклонов в плазме больше

$$(\sigma_s c \tau_\pi)^{-1} \sim 3 \times 10^{22} \text{ см}^{-3},$$

то развивается адронный каскад

Источники свободных нейтронов

1. тепловая диссоциация ядер



${}^4\text{He}$ – ядро гелия
 p – протон
 n – нейтрон

гамма-всплески, активные ядра галактик,
микроквazarы, начальные стадии сверхновых

Источники свободных нейтронов

2. захват электронов

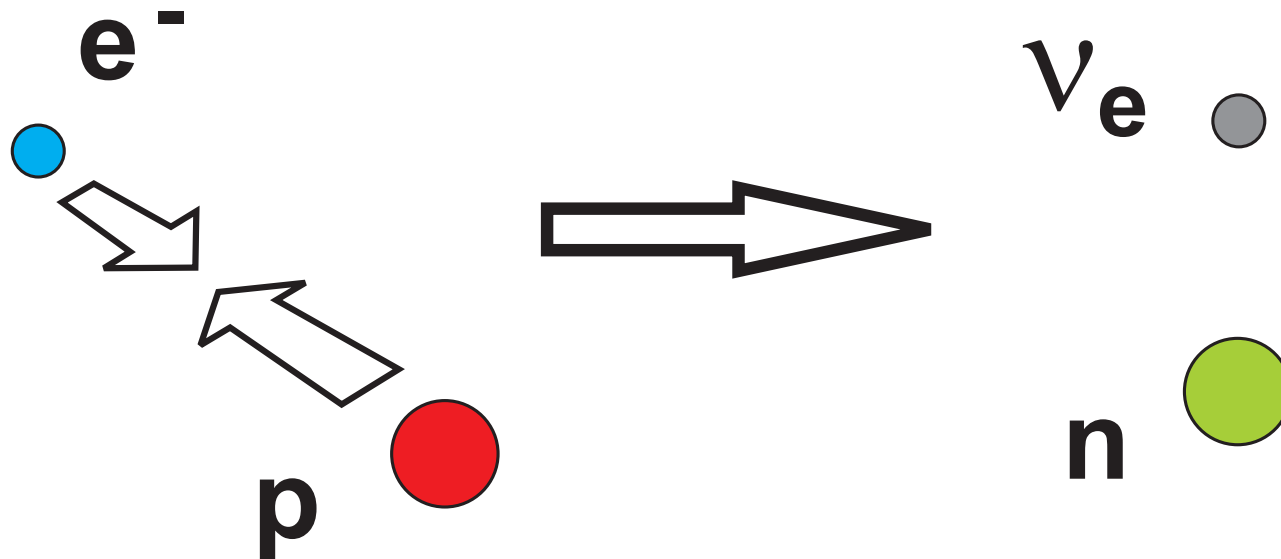


необходимо

$$\rho > 10^8 \text{ г/см}^3$$

или

$$T \gtrsim 5 \text{ МэВ}$$



e^- – электрон

ν_e – электронное
нейтрино

гамма-всплески,

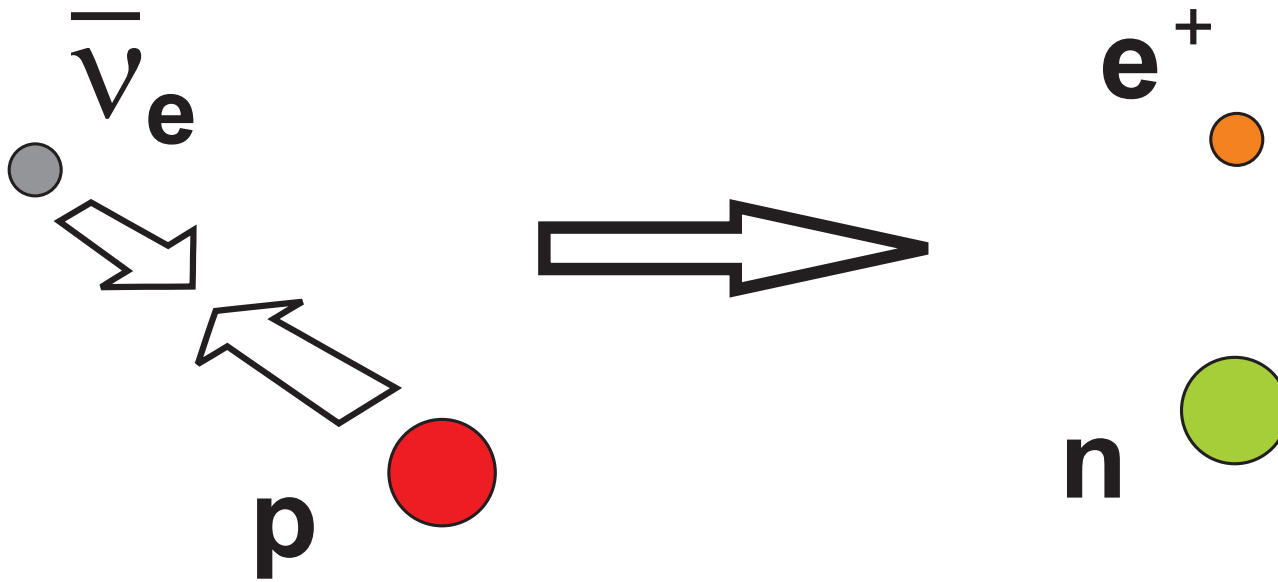
начальные стадии сверхновых

Источники свободных нейтронов

3. обратный бета-распад

$$p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+ \quad \sigma = 9.3 \times 10^{-44} \text{ см}^2 \left(\frac{\epsilon_\nu}{1 \text{ МэВ}} \right)^2$$

$$\epsilon_\nu \gg (m_n - m_p)c^2$$

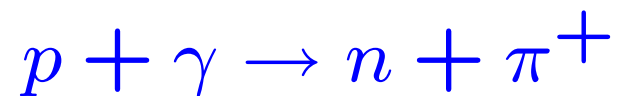


сверхновые звезды,

гамма-всплески (?)

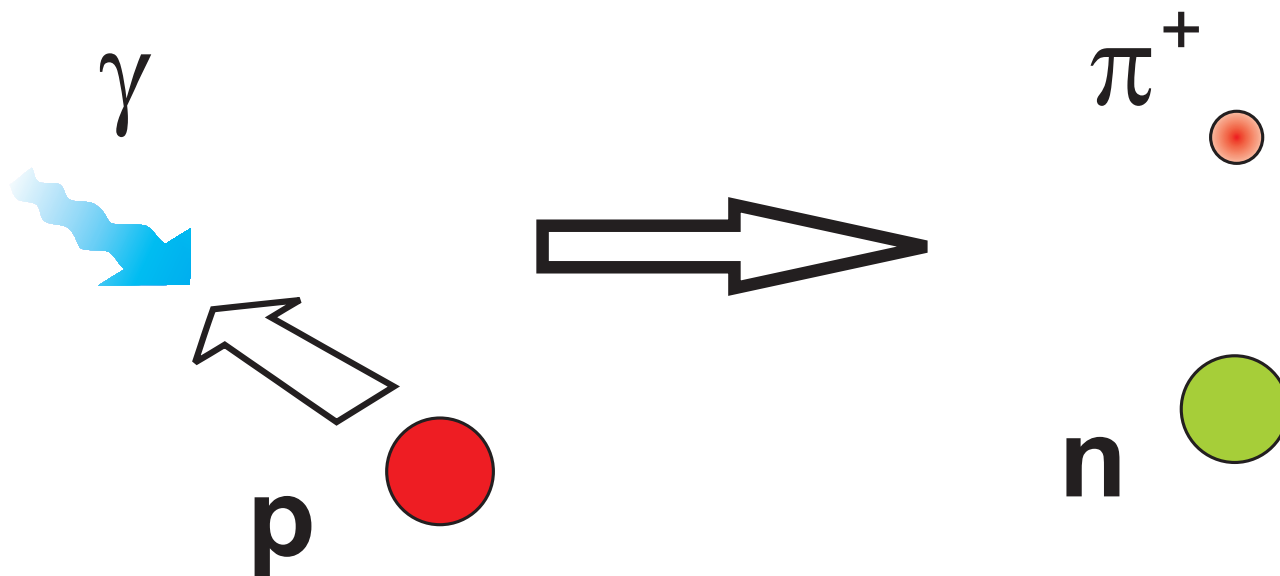
Источники свободных нейтронов

4. фотопионные реакции



КОМПАКТНОСТЬ

$$\ell \gtrsim \frac{10^7}{\Gamma_p}$$



π^- – пион

γ – фотон

Γ_p – лоренц-фактор
протона

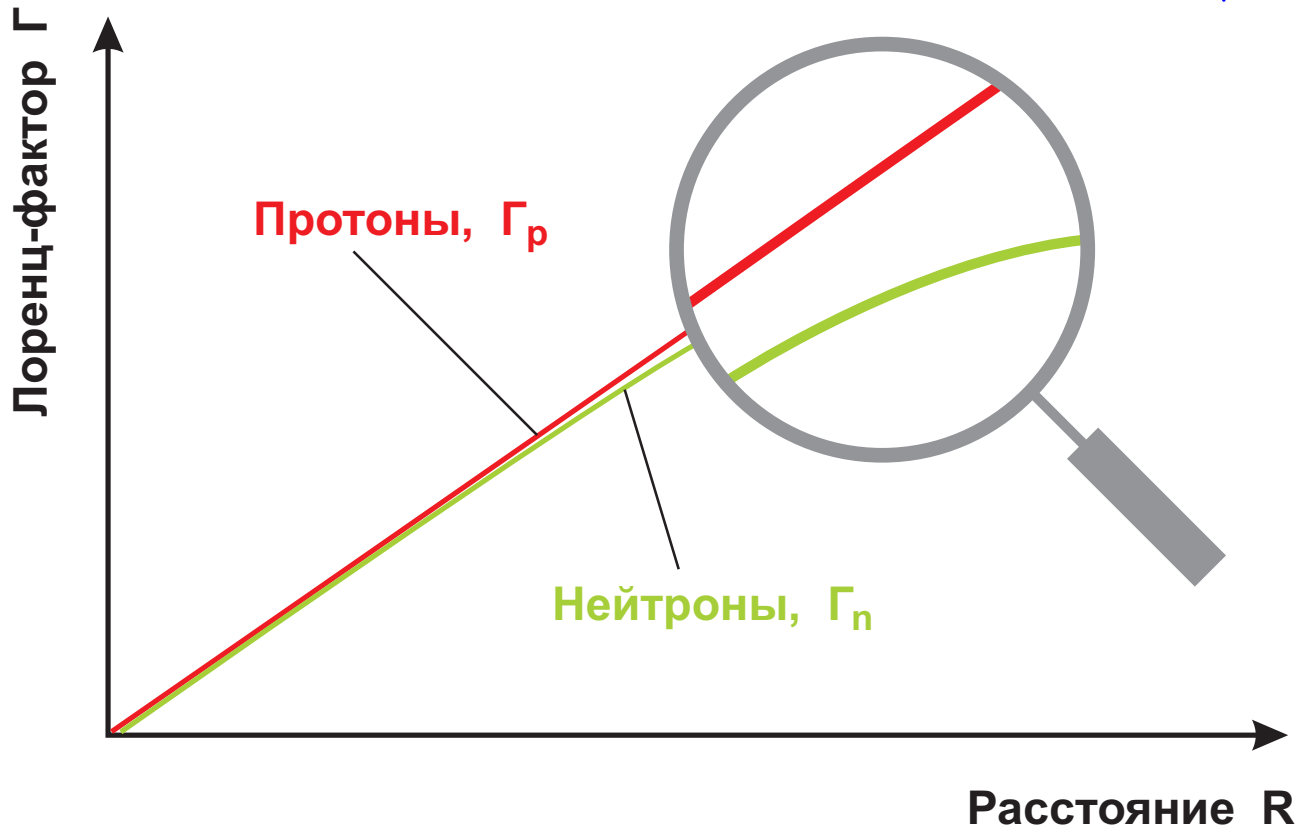
гамма-всплески,

активные ядра галактик

Двухкомпонентный релятивистский ветер

Гидродинамический лоренц-фактор:

$$\sqrt{g_{00}} \frac{\Gamma}{\Gamma_l} + g_{00}^{1/3} \left(\frac{\Gamma R_s}{\Gamma_l R} \right)^{2/3} = 1$$



Γ_l – предельный лоренц-фактор

R_s – длина ускорения джета

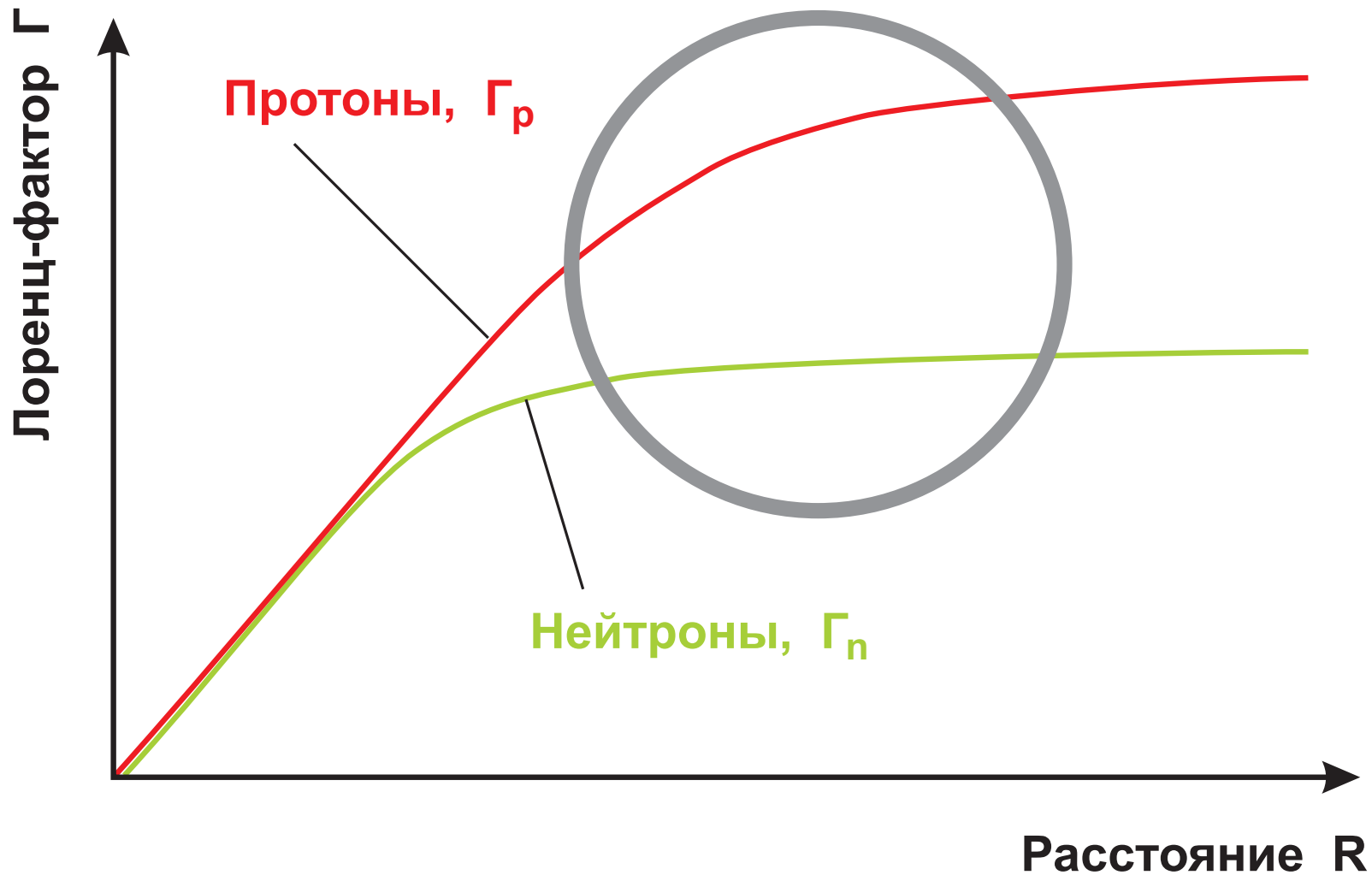
g_{00} – компонента метрического тензора

Относительная скорость нейтронов

$$\frac{dv}{dt_0} = c^2 \frac{d\Gamma}{dR} - \frac{\nu v}{2}$$

t_0 – собственное время, ν – (постоянная) частота столкновений

Расцепление протонной и нейтронной компонент



$X = \pi^-, \pi^+, \pi^0$ с примерно одинаковой вероятностью

Эффект коллективной отдачи

В пределе $\Gamma \gg \Gamma_n$: $\sum \varepsilon'_\nu \simeq \frac{\Gamma}{8\Gamma_n} m_n c^2$

$$\sum \varepsilon_\nu \simeq \frac{\Gamma^2}{8\Gamma_n} (\varepsilon_p + \varepsilon_n)$$

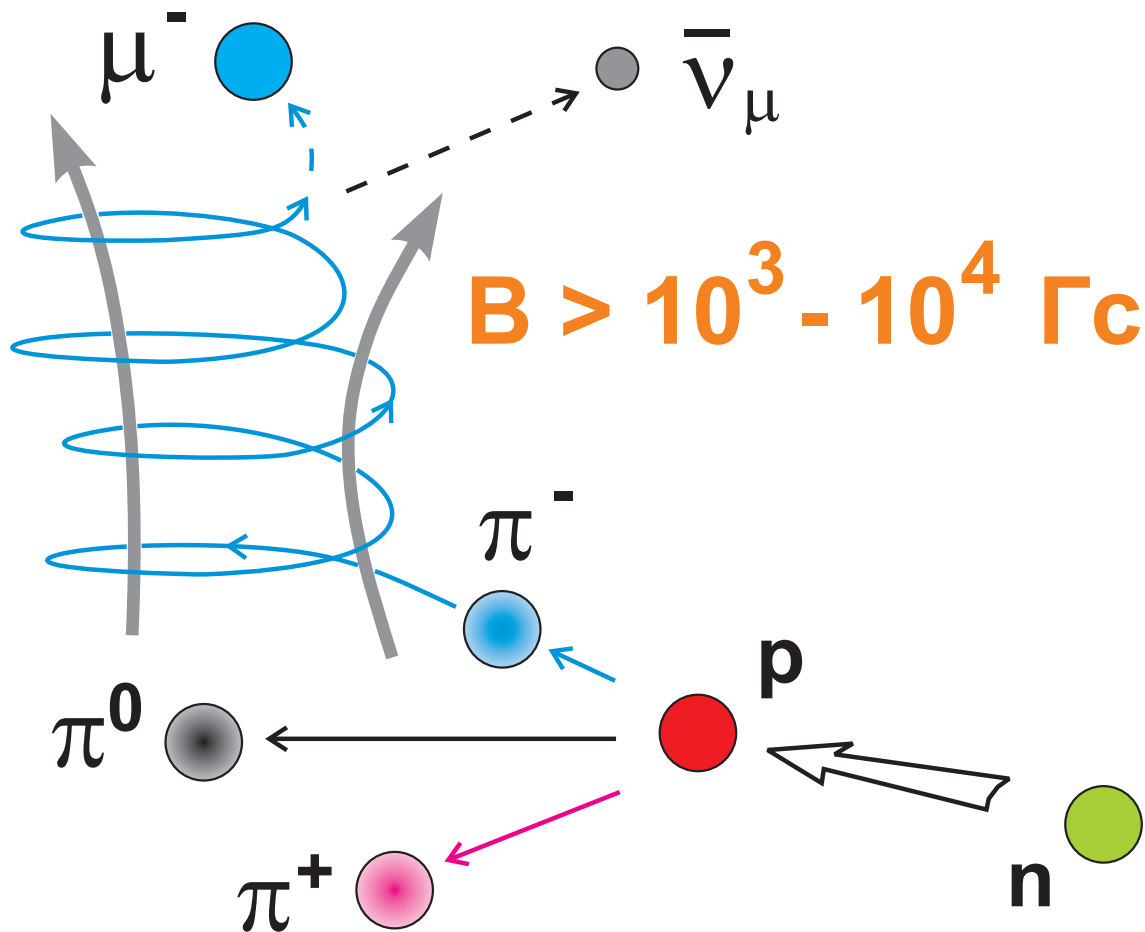
ε' – энергия частиц в
сопутствующей системе

ε – энергия частиц в
лабораторной системе

Γ_n – “гидродинамический”
лоренц-фактор нейтронов

Переданная потоку
тепловая энергия

$$dQ \simeq \frac{2}{\Gamma} \sum \varepsilon_\nu$$



Сильное расцепление: гидродинамика с потерями

Изменение потока энергии:

$$d(4\pi\Gamma^2(p+e)R^2c) = -\Gamma\frac{\Gamma}{8\Gamma_n}mc^24\pi R^2\Gamma Nc d\tau$$

Изменение внутренней энергии:

$$d(e\Gamma R^2) = -p d(\Gamma R^2) + \Gamma R^2 2N\frac{\Gamma}{8\Gamma_n}mc^2 d\tau$$

Уравнение непрерывности:

$$N\Gamma R^2 = \text{const}$$

N – концентрация нейтронов,

m – масса нуклона,

τ – оптическая толщина по протон-нейтронным столкновениям,

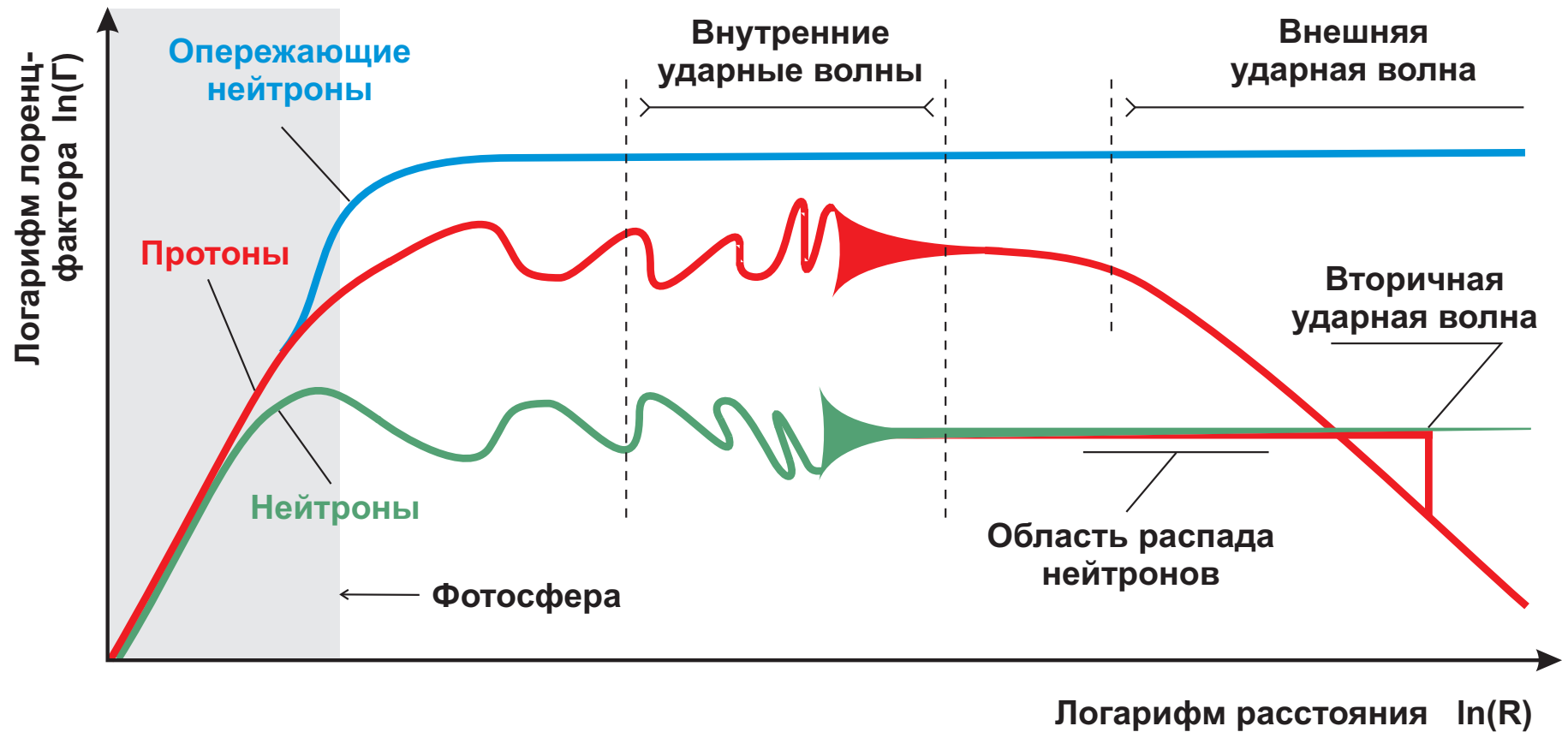
p – давление,

e – плотность внутренней энергии

[Первый интеграл:]

$$[(p+e)^{11/4}\Gamma^5 R^6 = \text{const}]$$

Сильное расщепление: следствия



- Повторная диссоциация гелия
- Появление опережающих нейтронов
- Излучение высокоэнергичных нейтрино
- Электромагнитный каскад; сдвиг фотосферы и появление жесткого гамма-излучения
- Вторичная ударная волна из-за распада медленных нейтронов