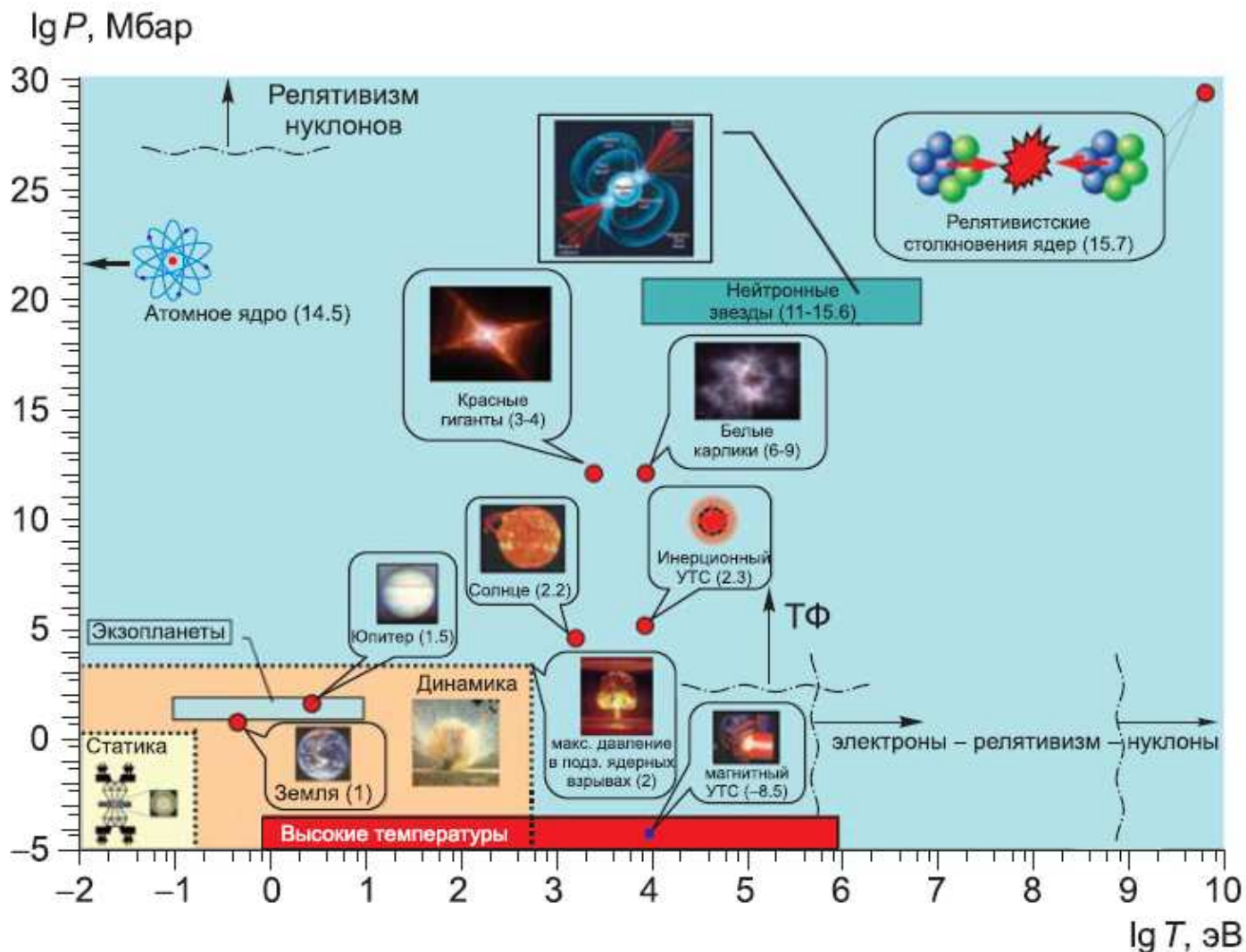


Лекция 2.

Характерные физические состояния плотной материи

1. Обзор экстремальных состояний вещества
2. Параметры плазмы высокой плотности
3. Вещество белых карликов и оболочек нейтронных звёзд
4. Вещество недр нейтронных звёзд

Экстремальные состояния вещества



Фортов В Е "Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе" *УФН* **179** 653–687 (2009)

Экстремальные состояния в природе и в лаборатории. Цифры в скобках указывают логарифм плотности в г/см^3 . Область «статика» соответствует статическому, «динамика» — динамическому методам получения высоких давлений, «высокие температуры» — экспериментам при высоких температурах

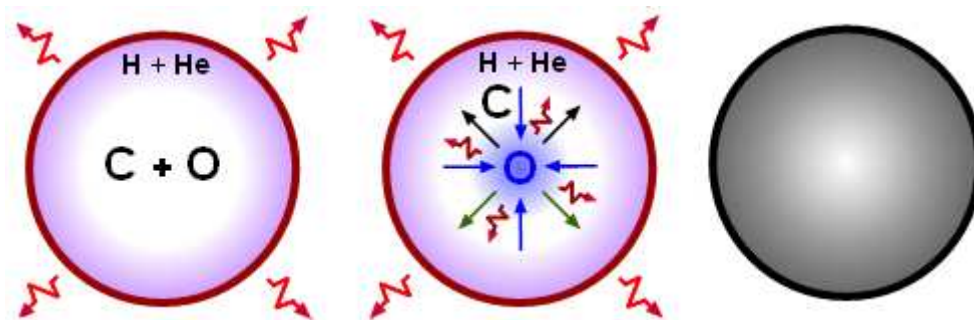
Экстремальные состояния вещества



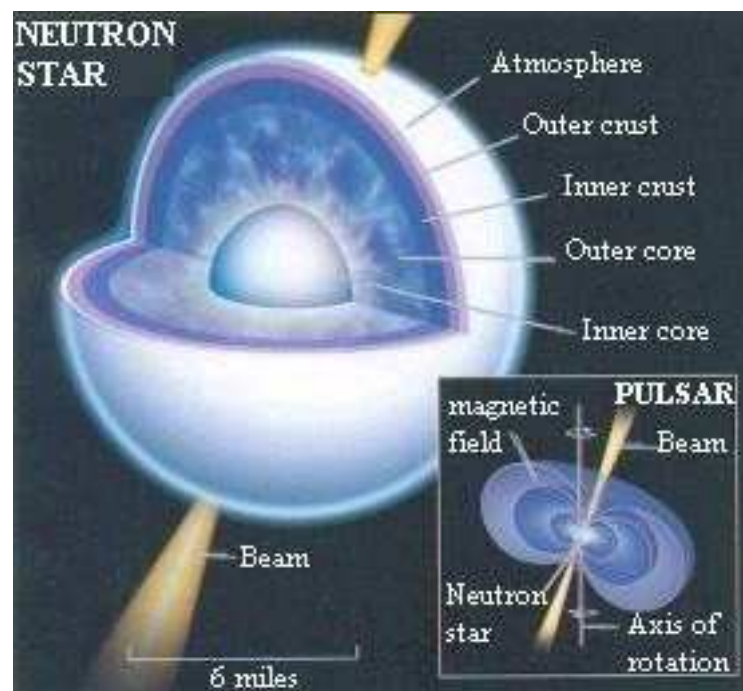
Форт В Е "Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе" *УФН* **179** 653–687 (2009)

Шкала давлений (1 атм ~ 10^5 Па) в природе составляет ~ 64 порядка величины. Правая часть шкалы относится к условиям, достижимым в эксперименте

Структура белого карлика



Структура нейтронной звезды



Основные параметры плазмы в белых карликах и внешних оболочках нейтронных звёзд

Концентрация электронов n_e , температура T

Концентрация ионов $n_i = n_e/Z$ Плотность $\rho = \frac{n_{24}}{1.66} \frac{A'}{Z}$, где $n_{24} \equiv \frac{n_e}{10^{24} \text{ cm}^{-3}}$

Параметр плотности $r_s = \frac{a_e}{a_0} \approx n_{24}^{-1/3} = \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{-1/3}$

где $a_e = \left(\frac{4}{3} \pi n_e \right)^{-1/3}$ – радиус электронной сферы, $a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$ – боровский радиус, $\rho_1 = 2.675 \frac{A'}{Z} \text{ g cm}^{-3}$

Основные параметры плазмы в белых карликах и внешних оболочках нейтронных звёзд

Концентрация электронов n_e , температура T

Концентрация ионов $n_i = n_e/Z$ Плотность $\rho = \frac{n_{24}}{1.66} \frac{A'}{Z}$, где $n_{24} \equiv \frac{n_e}{10^{24} \text{ cm}^{-3}}$

Параметр плотности $r_s = \frac{a_e}{a_0} \approx n_{24}^{-1/3} = \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^{-1/3}$

где $a_e = \left(\frac{4}{3}\pi n_e\right)^{-1/3}$ – радиус электронной сферы, $a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$ – боровский радиус, $\rho_1 = 2.675 \frac{A'}{Z} \text{ g cm}^{-3}$

Для ионов: $R_S = a_i \frac{m_i (Ze)^2}{\hbar^2} = 1822.9 r_s A Z^{7/3}$ $a_i \equiv \left(\frac{4}{3}\pi n_i\right)^{-1/3} = a_e Z^{1/3}$

Основные параметры плазмы в белых карликах и внешних оболочках нейтронных звёзд

Параметр плотности $r_s = a_e/a_0 = 1.172 n_{24}^{-1/3} = (\rho_1/\rho)^{1/3}$

где $a_e = \left(\frac{4}{3}\pi n_e\right)^{-1/3}$ – радиус электронной сферы, $a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$ – боровский радиус, $\rho_1 = 2.675 \frac{A'}{Z} \text{ g cm}^{-3}$

Электронный импульс Ферми: $p_F = \hbar(3\pi^2 n_e)^{1/3}$

Параметр релятивизма: $x_r = \frac{p_F}{m_e c} = 1.00884 \left(\frac{\rho_6 Z}{A'}\right)^{1/3} = 0.014005 r_s^{-1}$

Энергия Ферми: $\epsilon_F = c \sqrt{(m_e c)^2 + p_F^2} - m_e c^2 = m_e c^2 (\gamma_r - 1)$

$T_F \equiv \frac{\epsilon_F}{k_B} = T_r (\gamma_r - 1) \approx \begin{cases} 1.163 \times 10^6 r_s^{-2} \text{ K} & (x_r \ll 1) \\ T_r x_r & (x_r \gg 1) \end{cases}$ где $T_r \equiv \frac{m_e c^2}{k_B} = 5.93 \times 10^9 \text{ K}$ $\tau \equiv T/T_r$

Основные параметры плазмы в белых карликах и внешних оболочках нейтронных звёзд

Параметр плотности $r_s = a_e/a_0 = 1.172 n_{24}^{-1/3} = (\rho_1/\rho)^{1/3}$

где $a_e = \left(\frac{4}{3}\pi n_e\right)^{-1/3}$ – радиус электронной сферы, $a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$ – боровский радиус, $\rho_1 = 2.675 \frac{A'}{Z} \text{ g cm}^{-3}$

Электронный импульс Ферми: $p_F = \hbar(3\pi^2 n_e)^{1/3}$

Параметр релятивизма: $x_r = \frac{p_F}{m_e c} = 1.00884 \left(\frac{\rho_6 Z}{A'}\right)^{1/3} = 0.014005 r_s^{-1}$

Энергия Ферми: $\epsilon_F = c \sqrt{(m_e c)^2 + p_F^2} - m_e c^2 = m_e c^2 (\gamma_r - 1)$

$T_F \equiv \frac{\epsilon_F}{k_B} = T_r (\gamma_r - 1) \approx \begin{cases} 1.163 \times 10^6 r_s^{-2} \text{ K} & (x_r \ll 1) \\ T_r x_r & (x_r \gg 1) \end{cases}$ где $T_r \equiv \frac{m_e c^2}{k_B} = 5.93 \times 10^9 \text{ K}$ $\tau \equiv T/T_r$

Тепловая длина волны де Бройля: $\lambda_i = \left(\frac{2\pi\hbar^2}{m_i k_B T}\right)^{1/2}$ $\lambda_e = \left(\frac{2\pi\hbar^2}{m_e k_B T}\right)^{1/2}$

Основные параметры плазмы в белых карликах и внешних оболочках нейтронных звёзд

Параметр плотности $r_s = a_e/a_0 = 1.172 n_{24}^{-1/3} = (\rho_1/\rho)^{1/3}$

где $a_e = \left(\frac{4}{3}\pi n_e\right)^{-1/3}$ – радиус электронной сферы, $a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$ – боровский радиус, $\rho_1 = 2.675 \frac{A'}{Z} \text{ g cm}^{-3}$

Кулоновский параметр: $\Gamma = \frac{(Ze)^2}{a_i k_B T} = \Gamma_e Z^{5/3}$, где $\Gamma_e \equiv \frac{e^2}{a_e k_B T} \approx \frac{22.75}{T_6} \left(\rho_6 \frac{Z}{A}\right)^{1/3}$

Ионная плазменная частота $\omega_p = \left(\frac{4\pi e^2 n_i Z^2}{m_i}\right)^{1/2}$

$$T_p \equiv \frac{\hbar \omega_p}{k_B} \approx 7.832 \times 10^6 \left(\frac{\rho_6}{A'} \frac{Z^2}{A}\right)^{1/2} \text{ K}$$

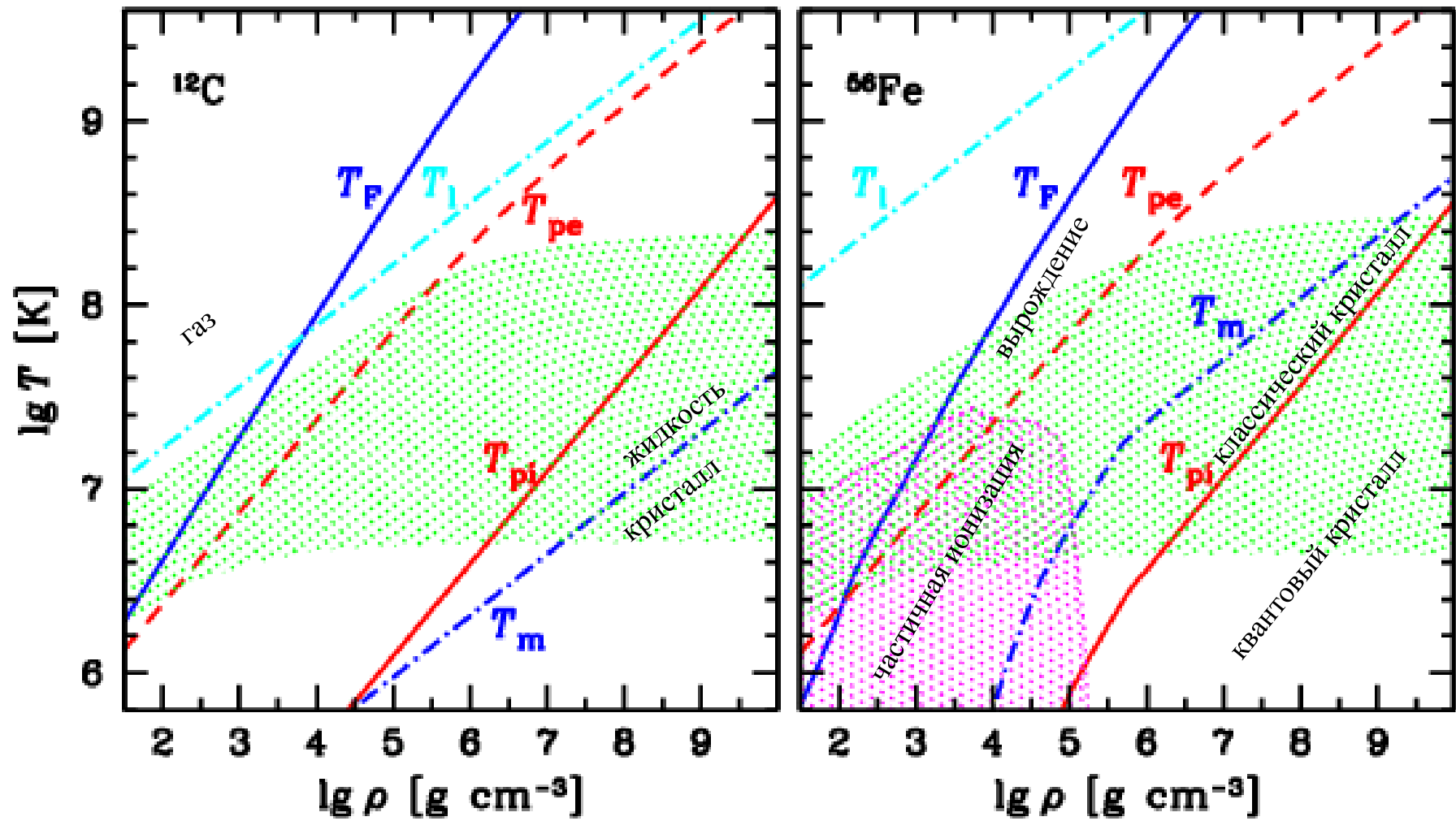


Диаграмма состояния плазмы в оболочках нейтронных звёзд.
Зелёным затенением показаны характерные значения температуры.

Нейтронизация вещества

$$A_Z + e^- = A_{Z-1} + \nu$$

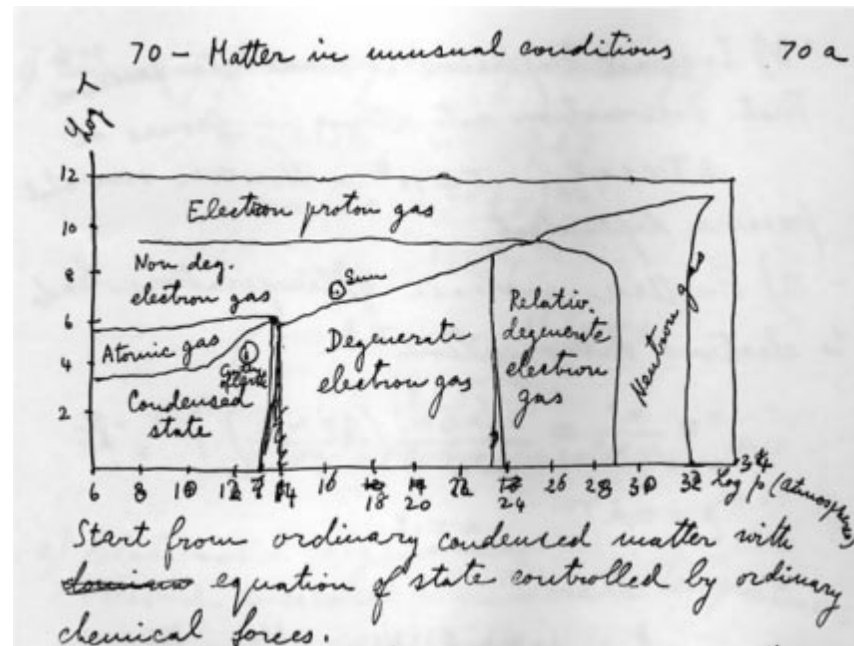
$$-\varepsilon_{A,Z} + \mu_e(n_e) = -\varepsilon_{A,Z-1}$$

$$\varepsilon_{A,Z} - \varepsilon_{A,Z-1} = \Delta: \quad \mu_e(n_e) = \Delta.$$

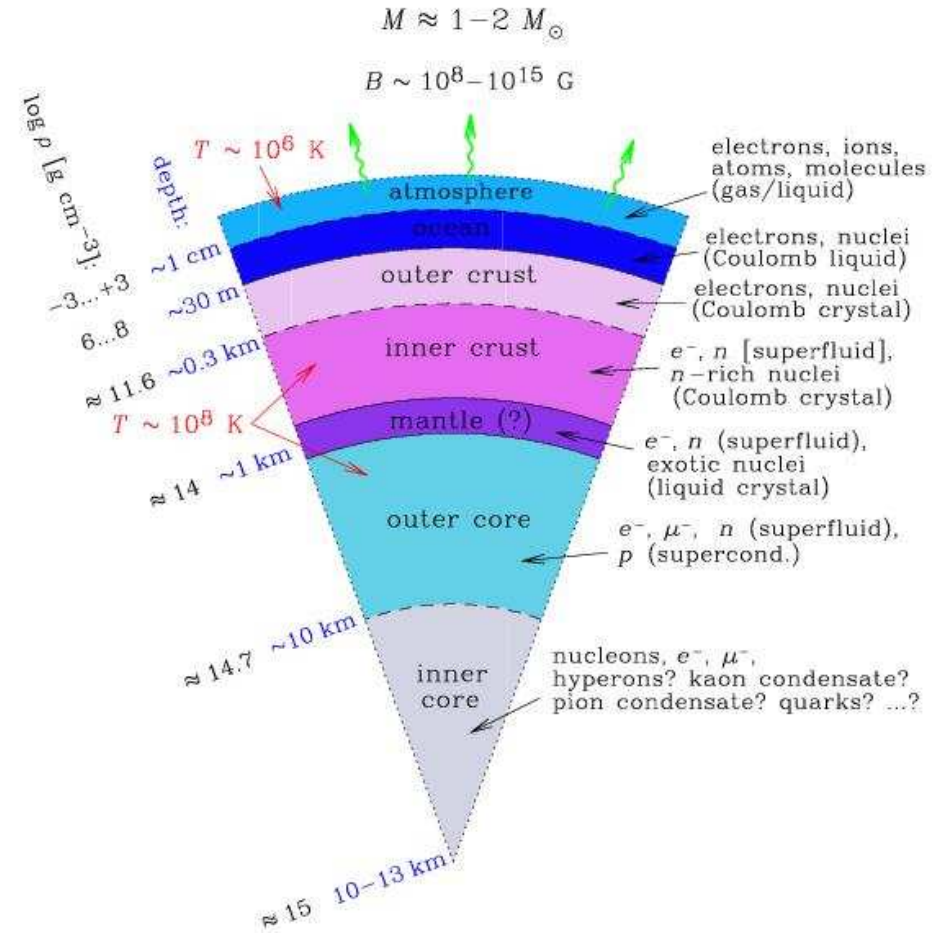
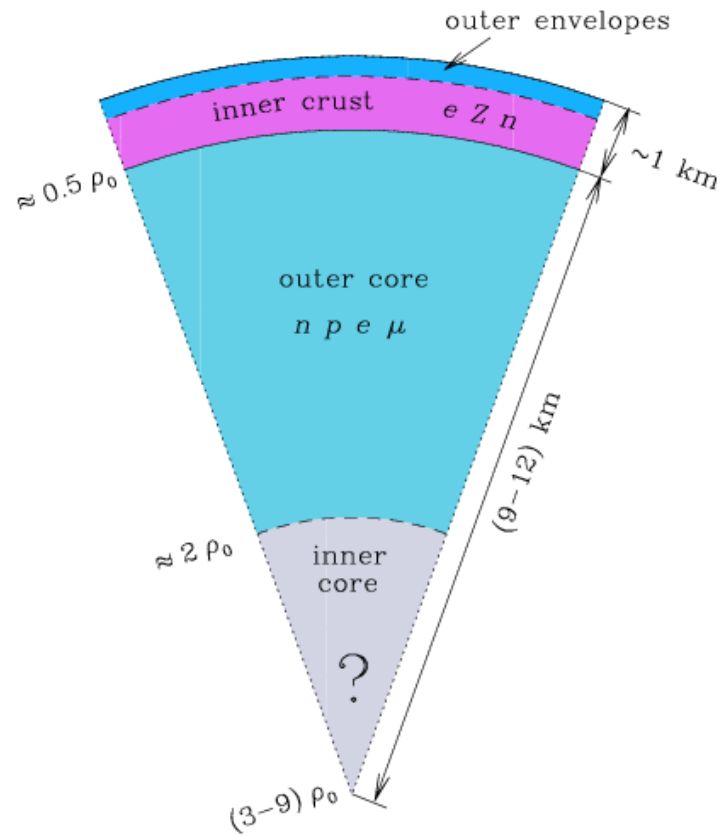
$$p_F = \hbar(3\pi^2 n_e)^{1/3}$$

$$\varepsilon_F = c \sqrt{(m_e c)^2 + p_F^2} - m_e c^2 = m_e c^2 (\gamma_T - 1) \quad \Rightarrow \quad n_e = \frac{\Delta^3}{3\pi^2 (c\hbar)^3}.$$

Диаграмма состояния
плотной плазмы:
рисунок Энрико Ферми
«Вещество в необычных
условиях» (1953)



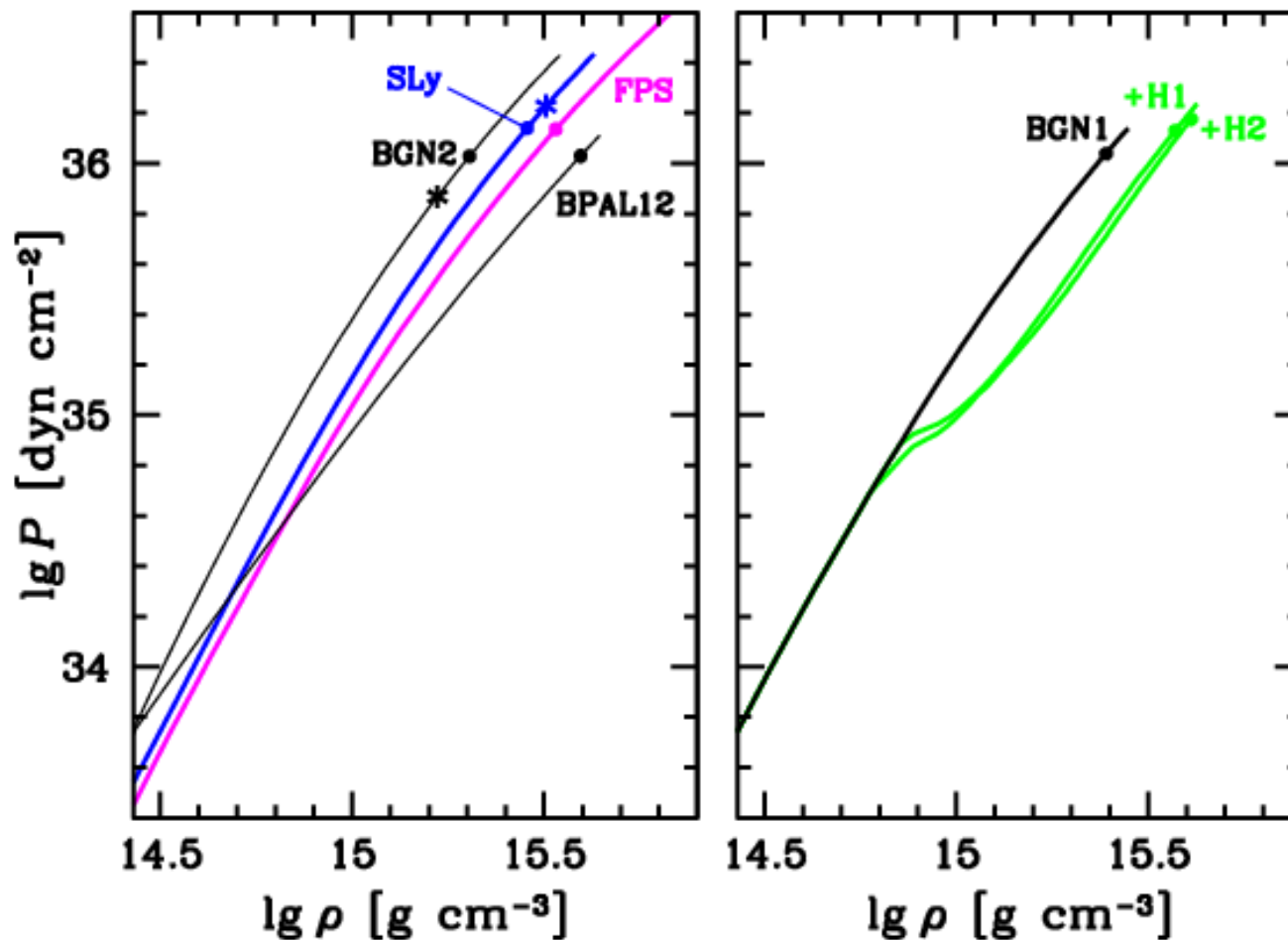
Строение нейтронной звезды



Гипотезы о внутреннем ядре

1. **Гиперонизация** – появление гиперонов, прежде всего Λ и Σ^- .
 2. **Пионный конденсат** – бозе-конденсация коллективных возбуждений, подобных π -мезонам.
 3. **Каонный конденсат** (возбуждения, подобные K -мезонам)
 4. **Фазовый переход к кварковой материи** (u , d , s кварки + немного электронов).
- Гипотезы 2 – 4 – **экзотические модели** плотного вещества.
 - **Состав** внутреннего ядра влияет на **уравнение состояния** и **нейтринные потери** энергии.
 - **Сверхтекучесть** в ядре влияет на **остывание** и механические свойства.
 - **Фазовый переход** может приводить к **более мягкому** уравнению состояния.

Уравнение состояния ядра нейтронной звезды



Примеры уравнений состояния для ядра нейтронной звезды.

Точки – пределы устойчивости, звёздочки – пределы каузальности (где скорость звука = скорости света).

[Haensel, Potekhin, & Yakovlev, *Neutron Stars. 1. Equation of State and Structure* (Springer, New York, 2007)]

Конфайнмент, деконфайнмент и кварковые звёзды

