

## ***СТРАННЫЕ ЗВЕЗДЫ***

**Р. Haensel**

*N. Copernicus Astronomical Center  
Warsaw*

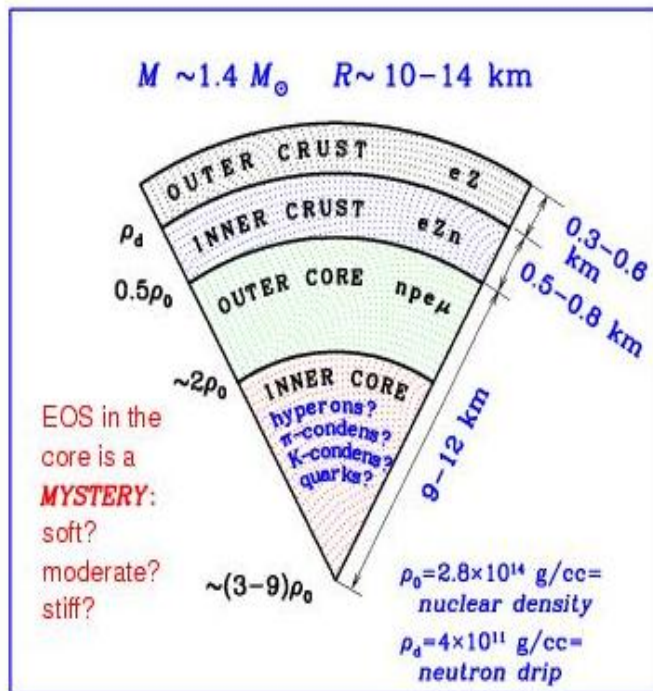
**Д.Г. Яковлев**

*Физико-технический институт  
имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*

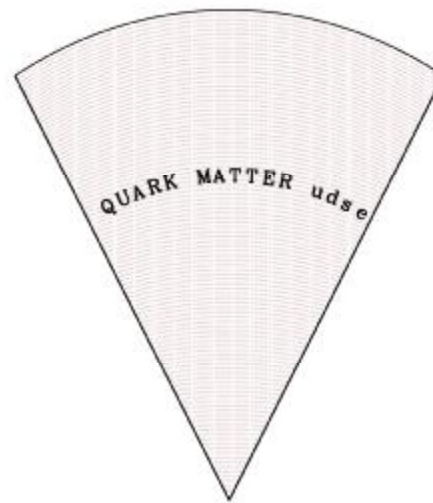
**Репино, февраль 2006**

**Странная материя:** *состоит из почти свободных легких кварков  $u, d, s$  и, может быть, электронов*

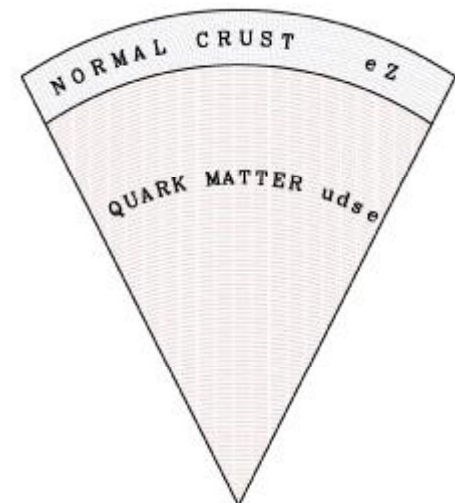
**Странные звезды:** *гипотетические компактные звезды, которые целиком или почти целиком состоят из странной материи*



**Обычная нейтронная звезда**



**Полностью странная звезда**



**Странная звезда с корой**

# ***ПЛАН***

- 1. Странная материя***
- 2. Модели странных звезд***
- 3. Конденсаторные слои***
- 4. Теория и наблюдения***
- Заключение***

## Кварковое вещество ( $u, d, s, e$ )

Спин = 1/2

Каждому кварку соответствует свой антикварк.

Каждый кварк может иметь три цвета.

Quark		mass MeV	charge e	S
u	up	~ 5	2/3	0
d	down	~ 7	-1/3	0
s	strange	~ 150	-1/3	-1

$$p^- = (\bar{u}d), \quad p^0 = (u\bar{u}) + (d\bar{d})$$

$$n = (udd), \quad p = (uud),$$

$$\Sigma^- = (dds), \quad \Lambda = (uds)$$

$$n \geq n_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}, \quad m \sim 500 \text{ MeV}$$

$$r \geq r_0, \quad T \ll m$$

## Кварковое вещество ( $u, d, s, e$ )

Кварки способны к сильным взаимодействиям путем обмена глюонами (квантовая хромодинамика). Кварк-кварковое взаимодействие – цветное; «обычные» адроны -- бесцветны

**Основные свойства:**

- (а) «невыветание» при низких энергиях
- (б) асимптотическая свобода при высоких энергиях.

**Основная проблема:**

*Квантовая хромодинамика хорошо работает в режиме асимптотической свободы:  $E \gg 1$  ГэВ,  $r \gg 10^{16}$  г/см<sup>3</sup>*

**История:**

**Gell-Mann & Zweig (1964)**

**Bodmer (1971) – “collapsed nuclei”**

**Chodos et al. (1974) – MIT Bag**

**Witten (1984) – SQM**

**Farhi & Jaffe (1984) – SQM with massive s-quarks**

## Модель мешка. Безмассовые не взаимодействующие кварки

**Модель мешка -- MIT Bag Model (Chodos et al. 1974) – эффекты «невыветания» учитываются введением вакуумной постоянной  $B$**

**Простейший пример --- модель безмассовых свободных кварков (color-flavor symmetry)**

$$n_e = 0, \quad n_u = n_d = n_s \equiv n_b, \quad p_{Fu} = p_{Fd} = p_{Fs} \equiv p_F$$

$$n_b = \frac{3 \times 2}{(2p\mathbf{h})^3} \int_{(p \leq p_F)} dp = \frac{p_F^3}{p^2 \mathbf{h}^3}$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{3 \times 2 \times 3}{(2p\mathbf{h})^3} \int_{(p \leq p_F)} dp cp = \frac{9}{4} cp_F n_b = \frac{9}{4} c\mathbf{h} p^{2/3} n_b^{4/3}$$

$$E = E_{\text{kin}} + B \equiv rc^2, \quad E = EV \Rightarrow E_{\text{kin}} = rc^2 - B$$

$$P = -\frac{\partial}{\partial V} E = -\frac{\partial}{\partial V} [V(E_{\text{kin}} + B)] = -E_{\text{kin}} - B - V \frac{\partial}{\partial V} E_{\text{kin}} = \frac{1}{3} rc^2 - \frac{4}{3} B$$

## Модель мешка. Безмассовые невзаимодействующие кварки

$$P = \frac{1}{3} r c^2 - \frac{4}{3} B = ac^2 (r - r_s),$$

$$P = 0 \quad \text{при} \quad r_s \equiv \frac{4B}{c^2} = 4.28 \times 10^{14} B_{60} \text{ г/см}^3 \quad B_{60} = B / (60 \text{ MeV/fm}^3)$$

$$e_b(uds) = \frac{E_s}{n_{bs}} = 837.26 (B_{60})^{1/4} \text{ MeV}$$

Обычное железо:  $e_b(\text{Fe}) = 930.4 \text{ MeV}$

**Странная материя будет стабильнее железа при  $B < 92 \text{ MeV/fm}^3$**

**Аналогично – плазма безмассовых свободных  $ud$ -кварков**

$$n_e = n_s = 0, \quad n_d = 2n_u \quad e_0(uds) < e_0(ud) \quad \text{энергия на один барион}$$

**Обычная материя будет стабильнее  $ud$ -материи при  $B > 59 \text{ MeV/fm}^3$**

$$59 \text{ MeV/fm}^3 < B < 92 \text{ MeV/fm}^3$$

## Модель мешка с массивным $s$ -кварком и КХД-взаимодействием

### «Нарушение CF симметрии»

Бета - процессы:

$$\begin{aligned} d &\rightarrow u + e + \bar{n}_e, & u + e &\rightarrow d + n_e \\ s &\rightarrow u + e + \bar{n}_e, & u + e &\rightarrow s + n_e \end{aligned} \quad n_e \sim 10^{-4} - 10^{-3} n_b, \quad m_e \sim 30 - 50 \text{ MeV}$$

Бета - равновесие:  $m_d = m_u + m_e$ ;  $m_s = m_u + m_e \Rightarrow m_d = m_s$

Нейтральность:  $\frac{2}{3} n_u - \frac{1}{3} n_d - \frac{1}{3} n_s - n_e = 0$

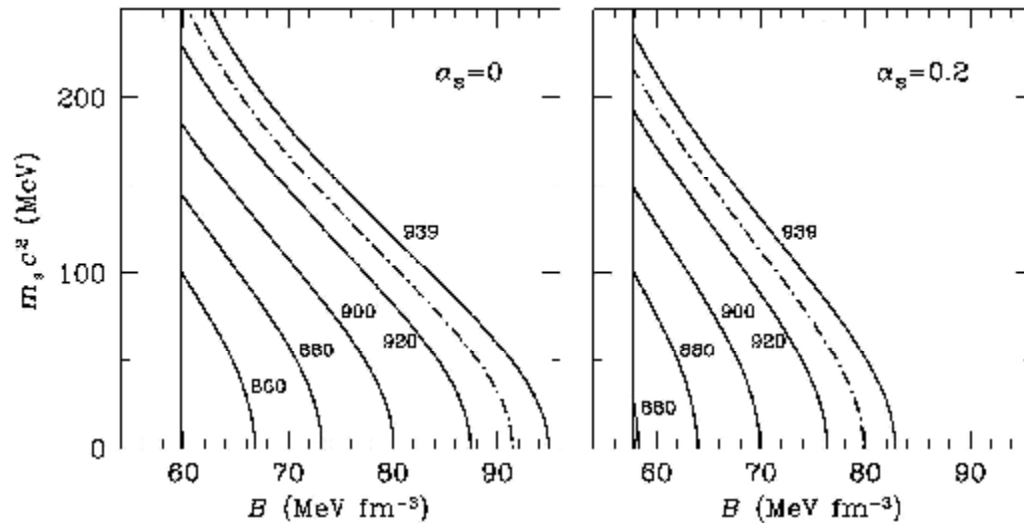
Теория включает два  
новых параметра:

$m_s$  – масса  $s$ -кварка

$a_s$  – константа взаимодействия



## Допустимые параметры уравнения состояния



*Линии постоянной энергии на один барион в странной кварковой материи при  $P=0$*

## Линейная аппроксимация уравнения состояния

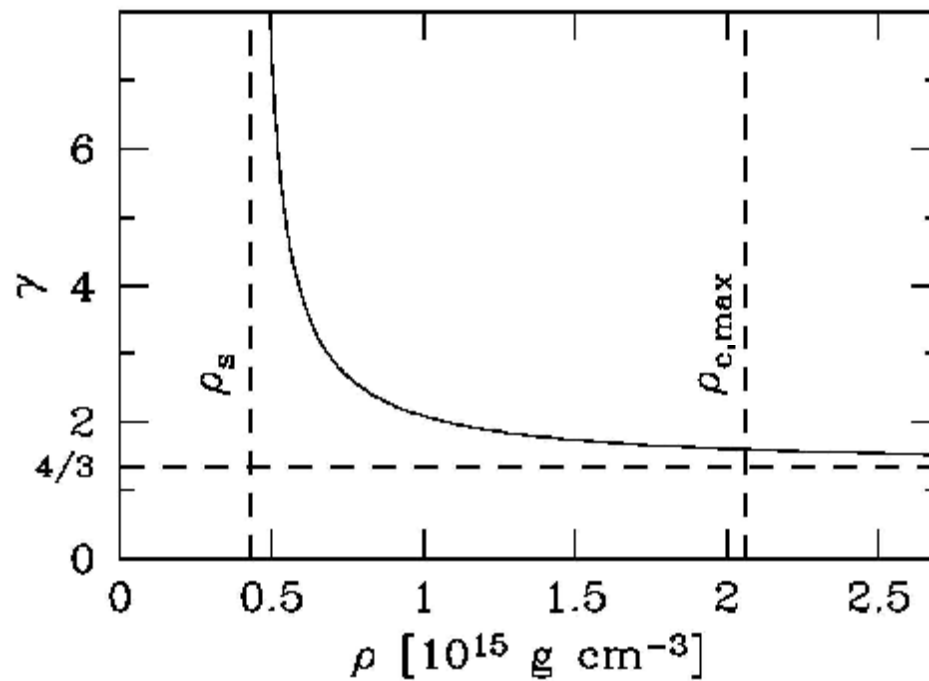
$$P = ac^2(r - r_s)$$

[1] Zdunik et al.  
(2000)

[2] Dey et al.  
(1998)

Model EOS	Reference	$a$	$r_s / 10^{14} \text{ g/cc}$
SQM1	[1]	0.301	4.50
SQM2	[1]	0.324	3.06
SS1	[2]	0.463	11.54
SS2	[2]	0.455	13.32

## Показатель адиабаты странной кварковой материи



SQM0 EOS, Haensel et al. (2006)

## Цветовая сверхпроводимость

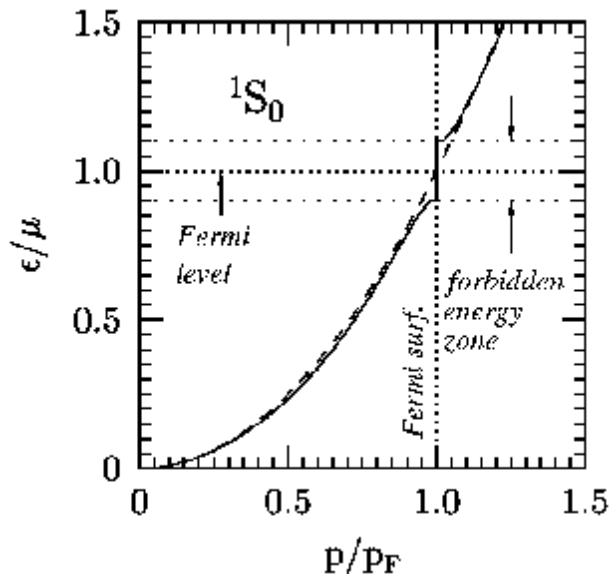
**Alford, Rajagopal & Wilczek (1998):** куперовское спаривание кварков в  $uds$ -плазме при  $m_s < 200$  MeV может привести к состоянию странной материи, в которой

$$n_e = 0, \quad n_u = n_d = n_s = n_b \quad (\text{"восстановление CF симметрии"})$$

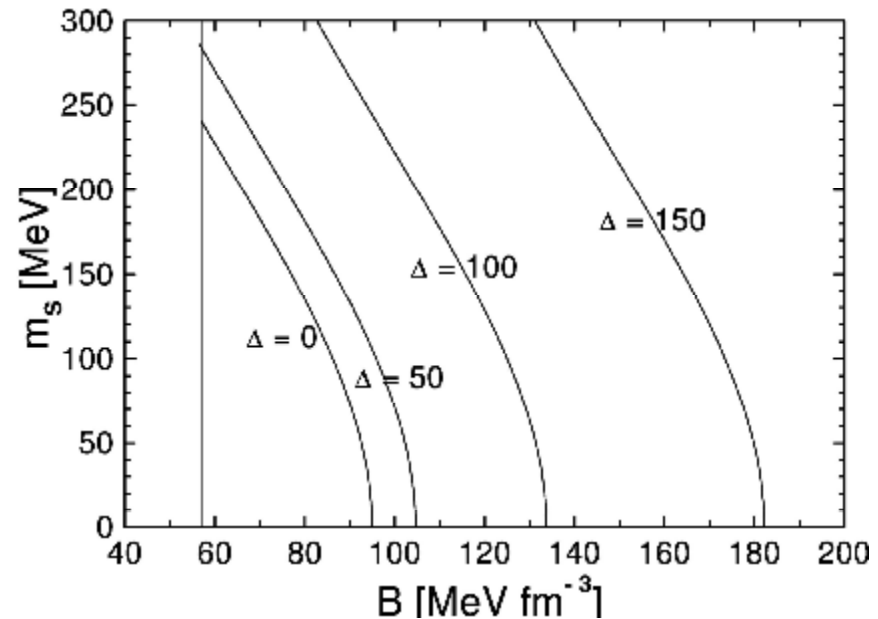
Такое состояние является сверхтекучим (сверхпроводящим) со щелью

$$\Delta \sim 100 \text{ MeV}$$

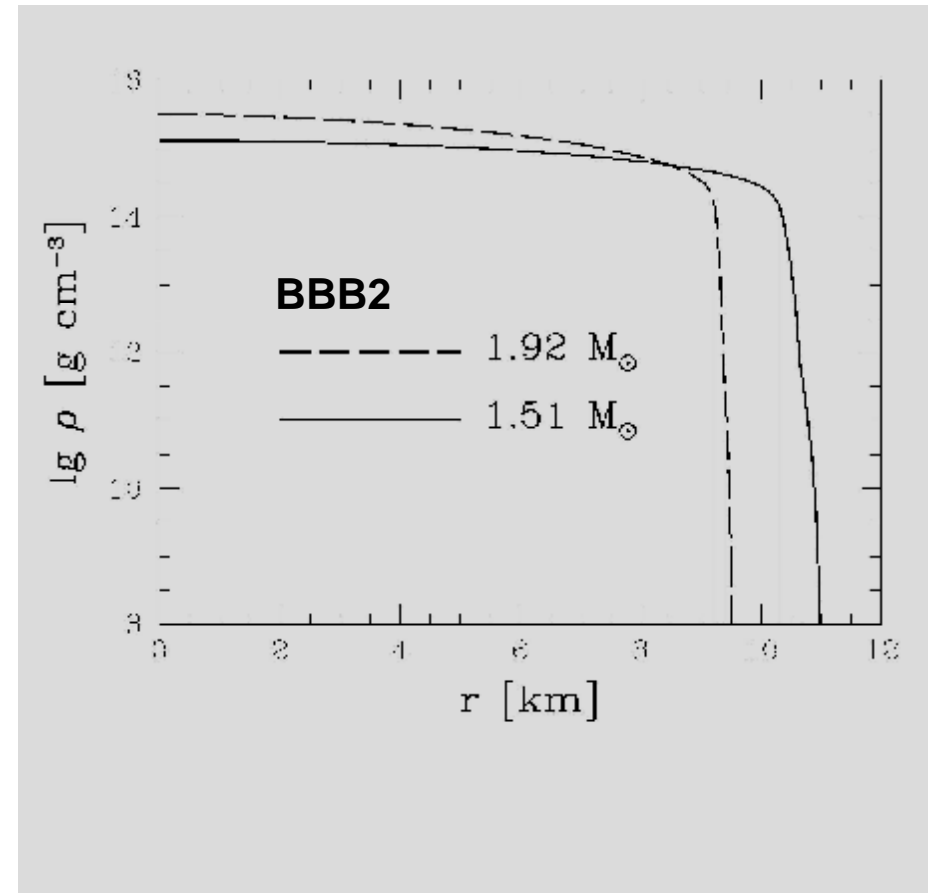
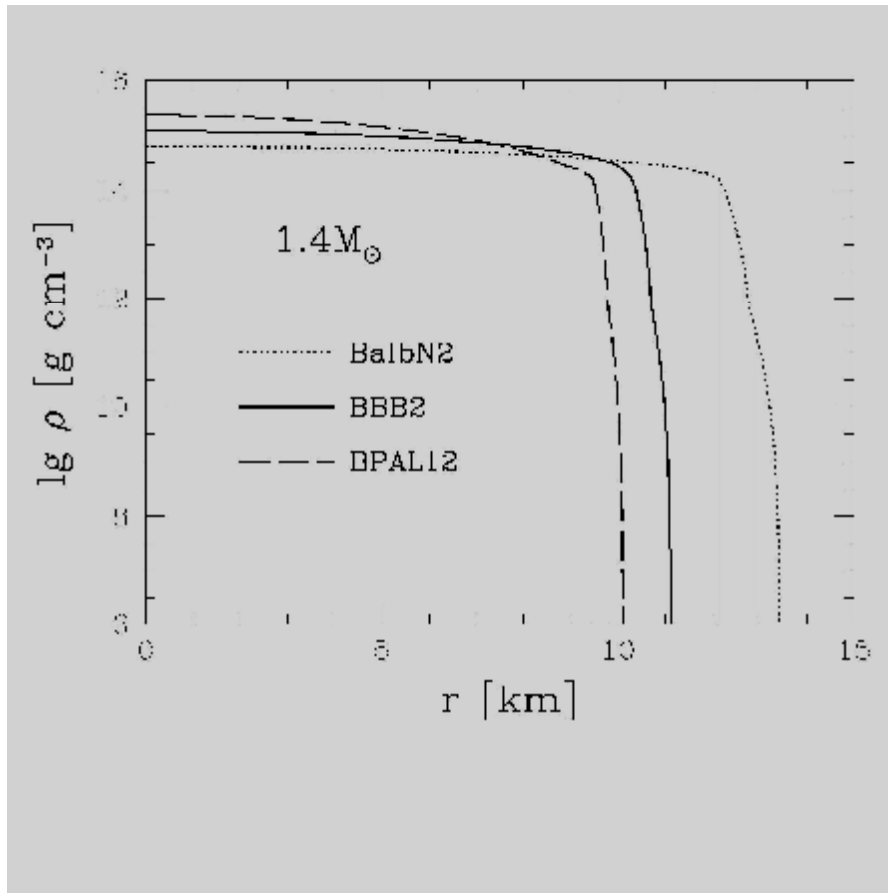
$$dP / P \sim (\Delta / m)^2$$



**Lugones & Horvath (2003),  $P=0$**



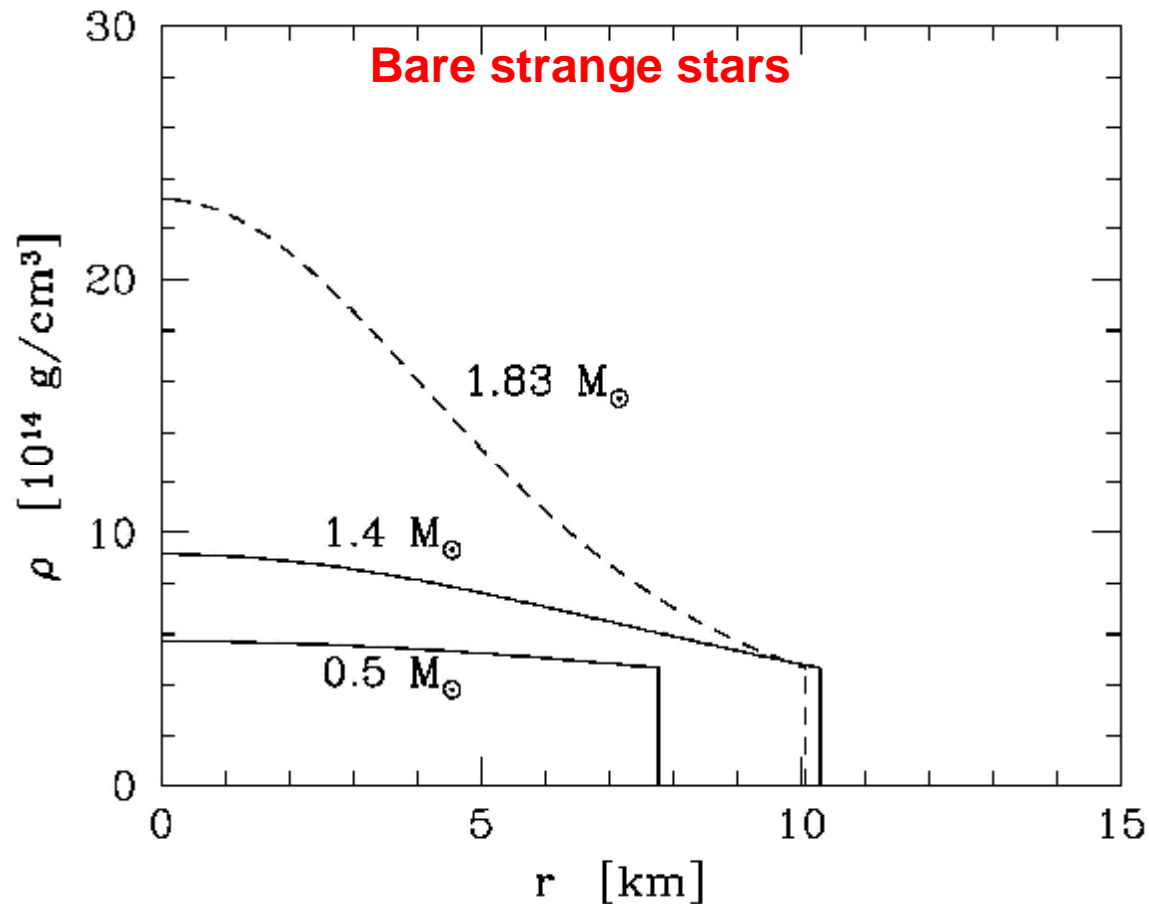
## МОДЕЛИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД



**Чем мягче уравнение состояния, тем компактнее звезда и выше центральная плотность**

**При одном уравнении состояния более массивная звезда более компактна**

## ПОЛНОСТЬЮ СТРАННЫЕ ЗВЕЗДЫ



**Маломассивные  
странные звезды  
состоят из почти  
несжимаемого  
вещества. Эти звезды  
не связаны  
гравитационными  
силами и имеют  
малые радиусы  
(в отличие от  
нейтронных звезд)**

**История:**

**Иваненко & Курдгеладзе  
(1965)**

**Itoh (1970)**

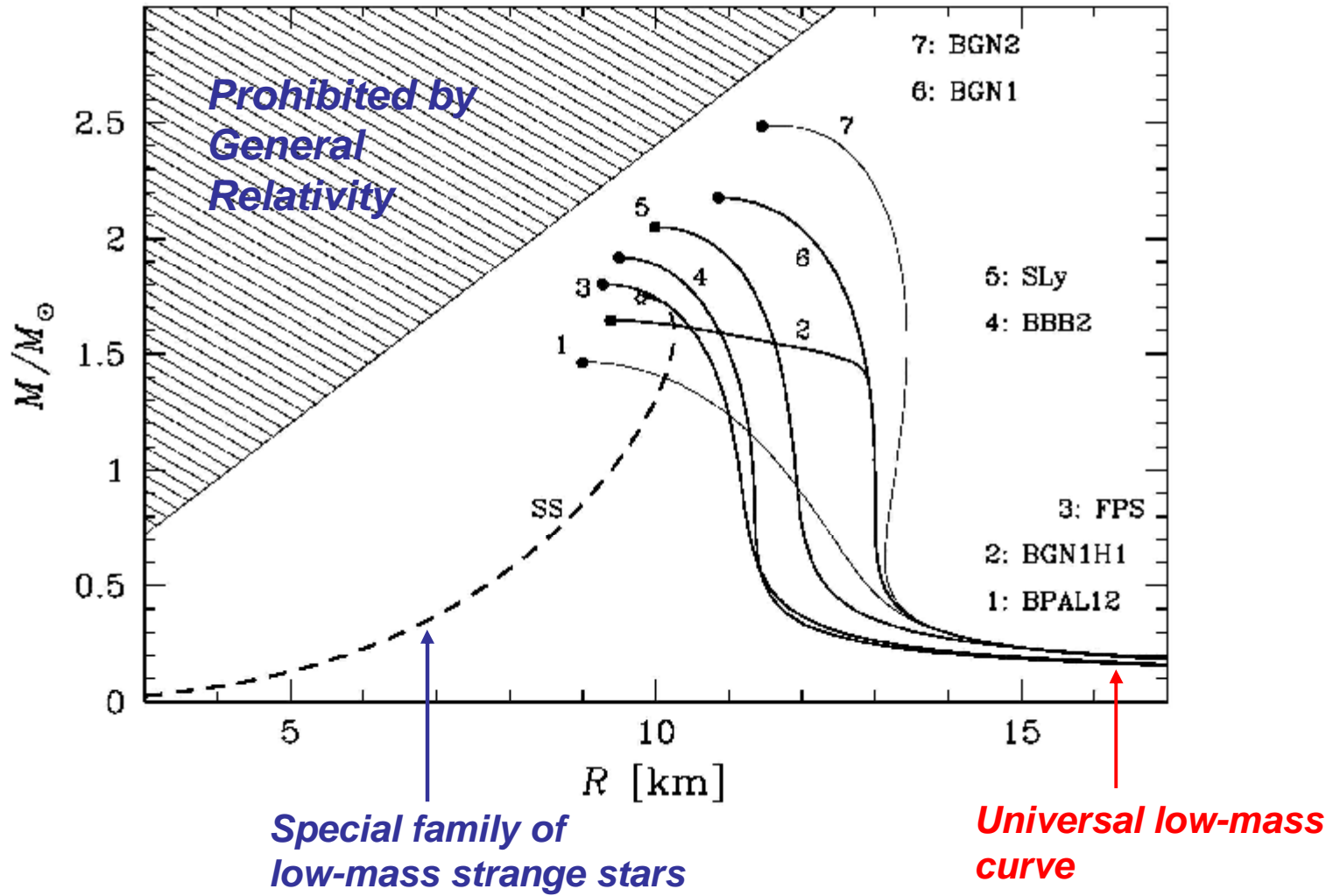
**Brecher & Caporaso (1976)**

**Witten (1984)**

**Haensel, Zdunik, Schaeffer (1986)**

**Alcock, Farhi, Olinto (1986)**

# Диаграмма масса -- радиус



## Соотношения подобия

$$P = ac^2(r - r_s)$$

$$a = a' \Rightarrow R' = R (r_s / r'_s)^{1/2}, \quad M' = M (r_s / r'_s)^{1/2}$$

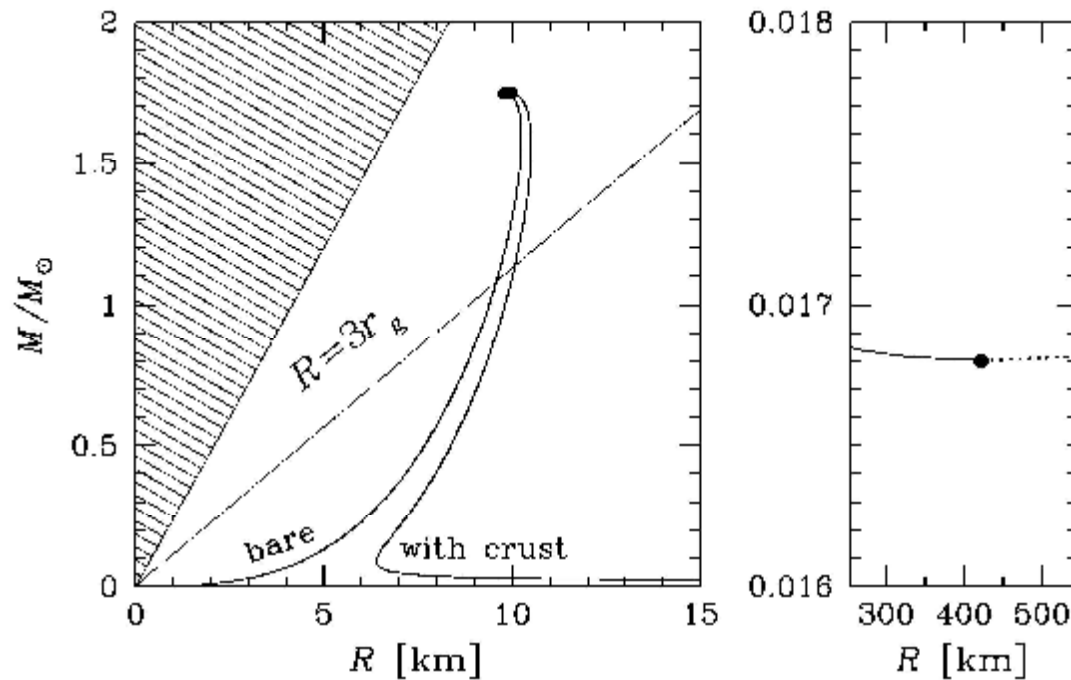
$$I'(M'_{\max}) = I(M_{\max})(r_s / r'_s)^{3/2}, \quad r'_{\text{сmax}} = r_{\text{сmax}}(r'_s / r_s)$$

**Невзаимодействующие безмассовые кварки**  $a = 1/3, \quad r_s = 4B/c^2$

$$M_{\max} = \frac{1.96}{\sqrt{B_{60}}} M_{\text{Sun}}, \quad M_{\text{bmax}} = \frac{2.63}{B_{60}^{3/2}} M_{\text{Sun}}, \quad r_{\text{сmax}} = \frac{2.06}{B_{60}} 10^{15} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

$$R(M_{\max}) = \frac{10.71}{\sqrt{B_{60}}} \text{ km}, \quad I_{\max} = \frac{2.12}{B_{60}^{3/2}} 10^{45} \text{ г см}^2$$

## Странные звезды с корой и без коры



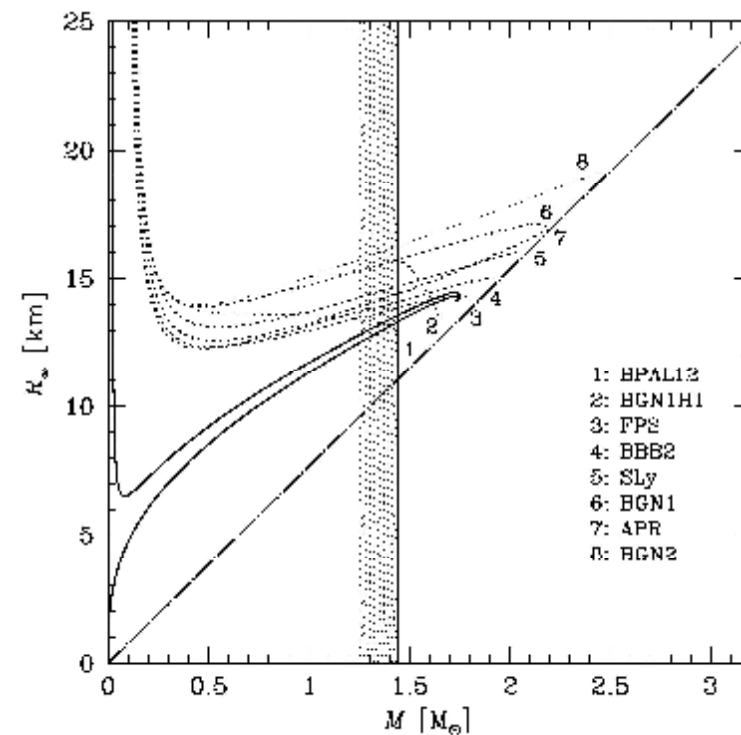
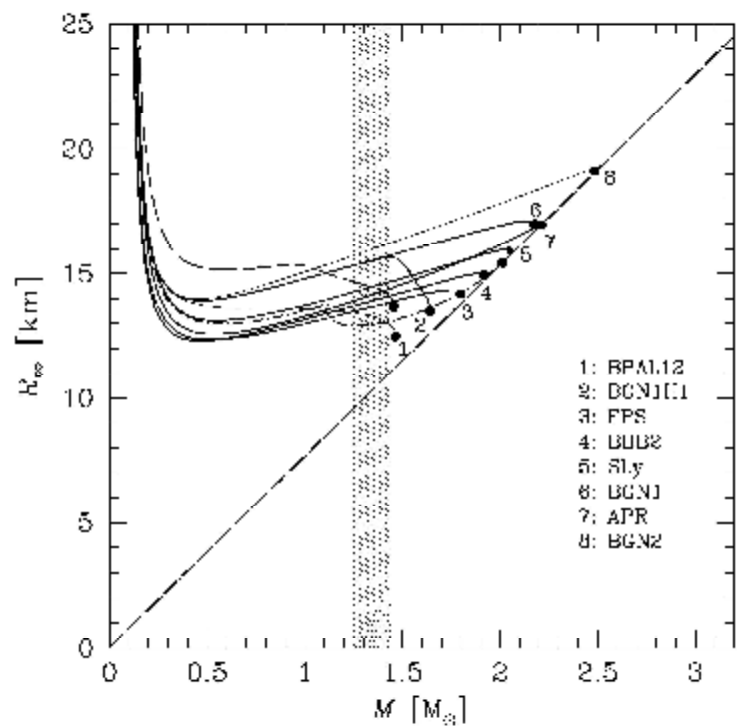
SQM1 EOS; Haensel et al. (2006)

### Странные звезды с нормальной корой:

При  $M \sim M_{\text{SUN}}$  :  $r_{\text{crust}}^{\text{max}} \leq 4 \times 10^{11}$  g/cc,  $M_{\text{crust}}^{\text{max}} \leq 10^{-5} M_{\text{SUN}}$



# «Видимые» радиусы нейтронных и странных звезд



Предельная линия:  $r_g / R = 2/3$ ;  $R_\infty \equiv R / \sqrt{1 - r_g / R}$

Haensel et al. (2006)

# КОНДЕНСАТОРНЫЕ СЛОИ

## 1. Странные звезды без цветовой сверхпроводимости ( $u,d,s,e$ )

Поверхность целиком странной звезды

Граница кора-ядро странной звезды с корой

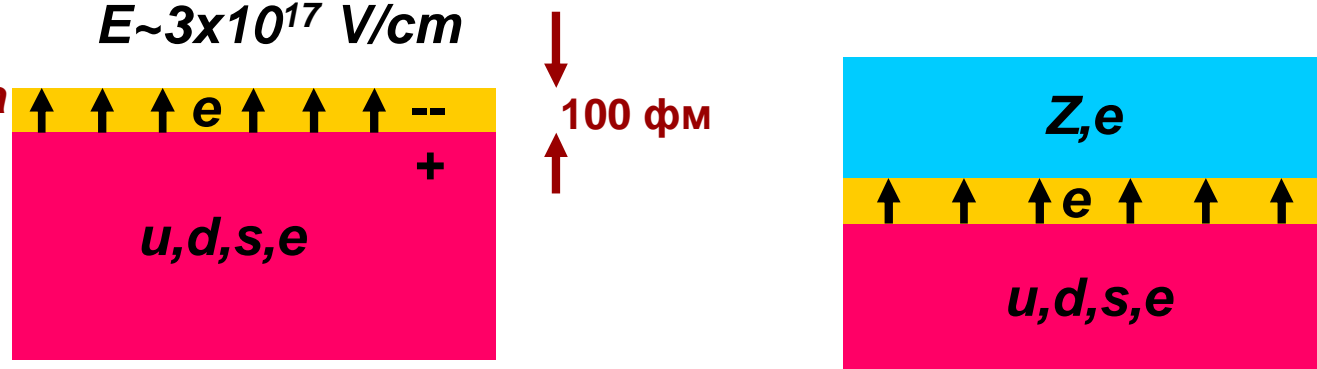
*Alcock, Farhi, Olinto (1986)*

$$E \sim 3 \times 10^{17} \text{ V/cm}$$

Электросфера

$$\hbar \omega_p \sim \text{orange arrow}$$

$$\sim 20 \text{ MeV!}$$



## 2. Странные звезды с цветовой сверхпроводимостью ( $u,d,s$ )

*Madsen (2001)*: массивность  $u$ -кварков ведет к избытку положительного заряда в странной материи вблизи границы

# КАК ОБНАРУЖИТЬ СТРАННЫЕ ЗВЕЗДЫ?

## *(1) Малые радиусы*

$$R < 7 - 8 \text{ km}, \quad R_{\infty} < 9 - 10 \text{ km}$$

*April 10, 2002: Drake et al. (2002); NASA News Release + astro/ph  
RX J1856—3754:  $R_{\infty} < (3.8 - 8.2) \text{ km}$*

## *(2) Очень быстрое вращение*

*January 1989, обнаружение пульсара с периодом  $P=0.5 \text{ ms}$   
в остатке сверхновой 1987A (Glendenning 1989)*

## **ВЫВОДЫ**

- (1) Странные звезды могут существовать в природе, скорее всего как альтернатива нейтронным звездам*
- (2) Основная трудность теоретического описания: отсутствие строгой теории странной материи*
- (3) Очень важно точно измерить радиусы компактных звезд, которые большинство ученых все-таки считают нейтронными*