

38-я Всероссийская конференция по космическим лучам



Модель быстрого остывания странных кварковых звезд и ее возможные следствия

Куприянова Е.А., Шаулов С. Б.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

1 июля 2024

План

- Кварковая и странная кварковая материя
- Странные кварковые звезды, возможные сценарии их образования
- Модели странных кварковых звезд
- Процессы, приводящие к остыванию странных кварковых звезд
- Оценка времени остывания и выбор модели самого быстрого остывания
- Возможные следствия быстрого остывания до температуры реликта: вклад в темную материю и квазиздра в космических лучах
- Выводы

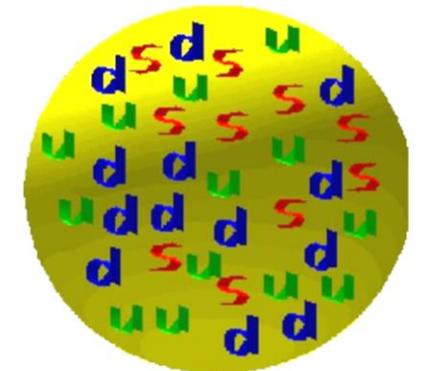
Кварковая и странная кварковая материя

- Кварковая материя – квазисвободные u и d кварки, заполняющие некоторый объем и образующие единый бесцветный барион, их волновые функции распределены по всему объему (модель Ферми-газа). Нестабильна, так как энергия на барионное число больше, чем для ядер.
- Странная кварковая материя (СКМ) – добавляются s кварки. Стабильна при условии, что $m_s < E_f$, $E_f \sim 300$ МэВ. Энергетически выгоднее, чем ядерная материя.



Ядра

Странная кварковая материя



Свойства странной кварковой материи

- На барионное число A приходится меньшая энергия, чем в обычных ядрах (E/A)
- Состоит из примерно равного количества u , d и s кварков и некоторого небольшого количества электронов для зарядовой нейтральности
- Энергии Ферми кварков всех ароматов примерно равны
- Стабильна в достаточном объеме ($A > 10^2 - 10^3$)
- Может образовывать капли размером от нескольких ферми до звездных, порядка 10 км
- Возможно, странная материя является основным состоянием ядерного вещества
- Ядерное вещество не может перейти в странное кварковое состояние при нормальных условиях: вероятность множественного перехода обычных кварков в s кварки крайне мала. Необходимы экстремальные условия высоких давлений и температур.

Странные кварковые звезды и основные сценарии их образования

Странные кварковые звезды – это звезды, недра которых или они целиком состоят из странной кварковой материи.

1. Последняя стадия эволюции нейтронных звезд – кварковые звезды (высокая плотность в ядре нейтронной звезды позволяет кваркам свободно перемещаться из нейтрона в нейтрон), которые легко преобразуются в странные кварковые [1]:
 - кварковая материя при высоких плотностях и давлениях в ядре переходит в странную за счет слабых взаимодействий
 - образовавшееся ядро из странной материи сможет поглощать нейтроны из окружающей звезды, превращая всю звезду в странную
2. Реликтовые странные кварковые звезды – скопления странной кварковой материи, которые образовались вскоре после Большого взрыва при фазовом переходе кварк-глюонной плазмы в адроны [1]. Помимо протонов и нейтронов могли возникнуть сгустки странной кварковой материи, самые крупные из которых должны были дожить до настоящего времени.

[1] E. Witten, Phys. Rev. D 30 (1984) 272–285

Модели странных кварковых звезд

Типичные кварковые звезды: $M = 1 - 2 M_{\odot}$, $R=10 - 12$ км

$R \approx 10$ км, приближение постоянного профиля плотности

Две модели плотности кваркового вещества:

$$\begin{aligned}\rho_b &= 3\rho_0 \\ M &\sim 1.6 M_{\odot} \\ Y_e &= \frac{\rho_e}{\rho_b} \approx 10^{-5}\end{aligned}$$

$\rho_0 = 2.8 \cdot 10^{14}$ г см⁻³ плотность ядерного насыщения

$$\begin{aligned}\rho_b &= 5\rho_0 \\ M &\sim 2 M_{\odot} \\ Y_e &= \frac{\rho_e}{\rho_b} \approx 0\end{aligned}$$

Кварковые звезды с оболочкой из обычной материи

$$\begin{aligned}T_s &= 5 \cdot 10^{-2} T, \\ M_{cr} &\leq 10^{-5} M_{\odot}\end{aligned}$$

«Голые» кварковые звезды (могут существовать, так как странная кварковая материя стабильна при нулевом давлении)

$$\begin{aligned}T_s &= T, \\ M_{cr} &= 0\end{aligned}$$

Процессы, приводящие к остыванию

Простая модель: D. Blaschke, T. Klähn, D.N. Voskresensky, *Astrophys. J.* 533 (1) (2000) 406.
Однородный температурный профиль внутри звезды.

$$\sum_{i=q,e,\gamma,g} C_i \frac{dT}{dt} = - \sum_{j=QDU, QMU, QB, cr} \epsilon_v^j - \epsilon_\gamma$$

Удельная теплоемкость:

Для электронной составляющей кварковой материи:

$$C_e \sim 0.6 \cdot 10^{20} (Y_e \rho_b / \rho_0)^{2/3} T_9 \text{ erg cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Для фотонной составляющей:

$$C_\gamma \sim 0.3 \cdot 10^{14} T_9^3 \text{ erg cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Для кварковой составляющей:

$$C_q \sim 10^{21} (\rho_b / \rho_0)^{2/3} T_9 \text{ erg cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Для глюонной составляющей:

$$C_g \sim 0.3 \cdot 10^{14} N_g T_9^3 \text{ erg cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Излучательная способность:

$$\epsilon_v^{QDU} \sim 10^{26} \alpha_s (\rho_b / \rho_0) Y_e^{1/3} T_9^6 \text{ erg cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$$

$$\epsilon_v^{QMU} \sim 10^{20} T_9^8 \text{ erg cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$$

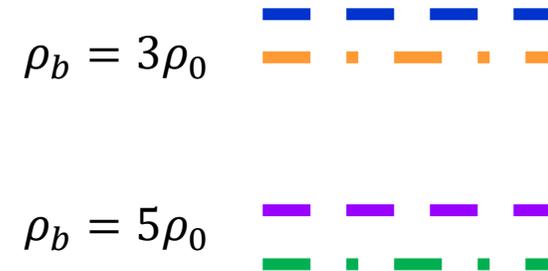
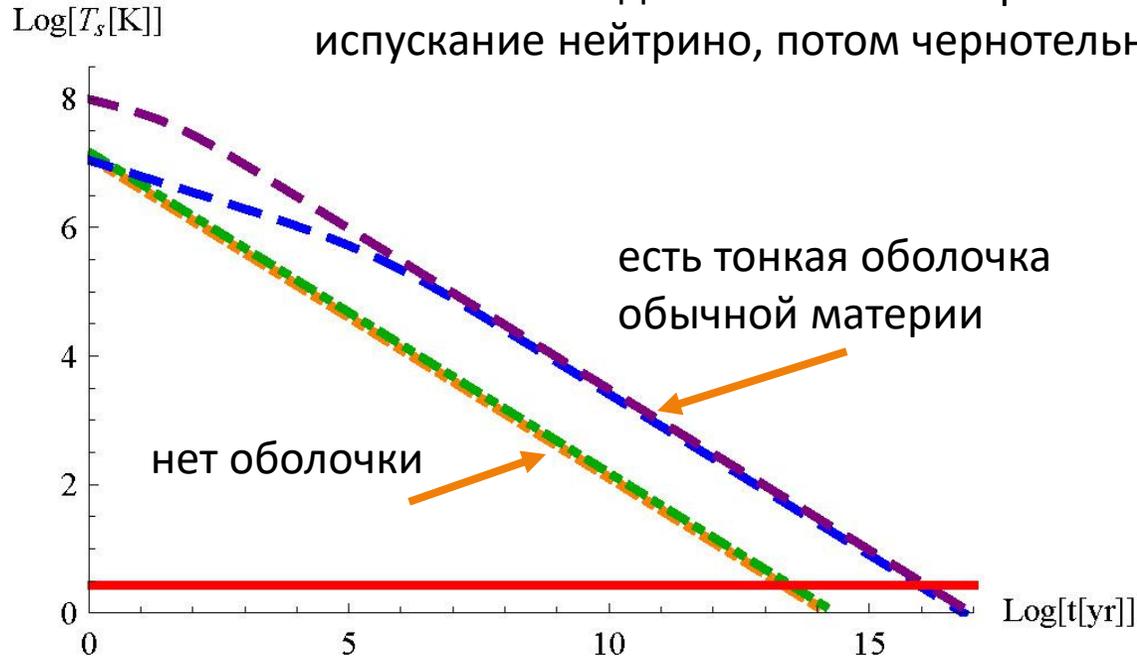
$$\epsilon_v^{QB} \sim 10^{20} T_9^8 \text{ erg cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$$

$$\epsilon_v^{cr} \sim 10^{21} (M_{cr} / M_\odot) T_9^6 \text{ erg cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$$

$$\epsilon_\gamma \sim 2 \cdot 10^{18} (R / 10 \text{ km})^2 T_{s7}^4 \text{ erg cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$$

Кривые остывания без учета кварковой цветной сверхпроводимости

Основной вклад в остывание: кварковая составляющая вещества звезды; испускание нейтрино, потом чернотельное испускание фотонов



Кривые остывания странной кварковой звезды без учета кварковой цветной сверхпроводимости. $T_s = 2.7$ K — **красный**.

При *отсутствии оболочки* и невысокой плотности барионной материи $\rho_b = 3\rho_0$:
 $t_{min} \sim 10^{13}$ yr
 $t_{Universe} = 1.4 \cdot 10^{10}$ yr

Учет кварковой цветной сверхпроводимости

Излучательная способность:

$$\epsilon_v^{QDU} = \epsilon_v^{QDU} \exp(-\Delta / T), \quad T < T_c$$

$$\epsilon_v^{QMU, QB} = \epsilon_v^{QMU, QB} \exp(-2\Delta / T), \quad T < T_c$$

Удельная теплоемкость:

$$C_{sq} \sim 3.2C_q \left(\frac{T_c}{T}\right) \exp\left(-\frac{\Delta}{T}\right) \left[2.5 - 1.7\frac{T}{T_c} + 3.6\left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right] \text{erg cm}^{-3}\text{K}^{-1}, \quad T < T_c$$

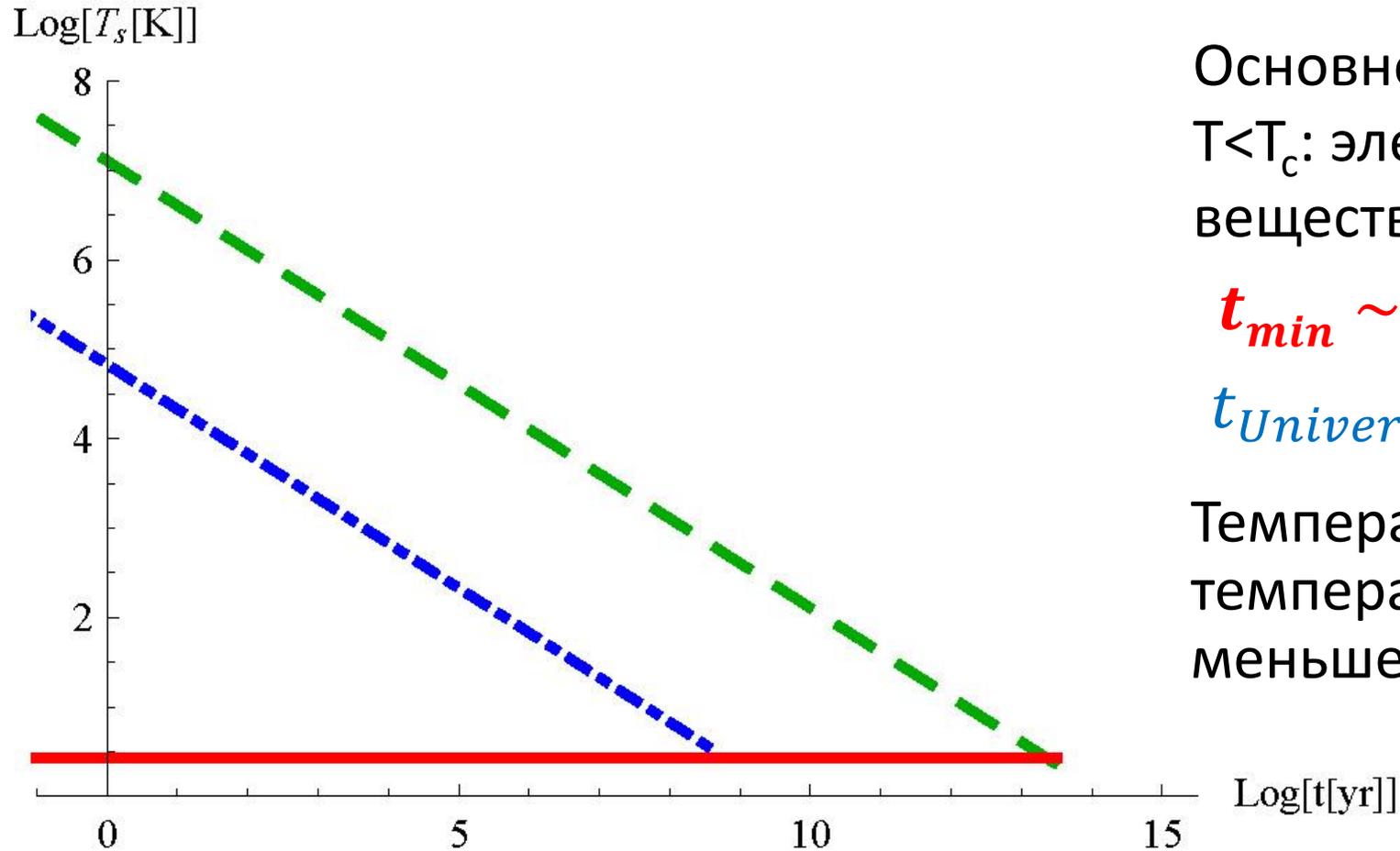
Добавляется вклад безмассовых Голдстоуновских бозонов: $C_\gamma \sim 0.3 \cdot 10^{14} T^3 \text{erg cm}^{-3}\text{K}^{-1}$

Разные модели цветной сверхпроводимости:

“uds-phase - small gaps” ($\Delta=0.1$ МэВ, $T_c= 6.6 \cdot 10^8$ К)

color-flavor-locked uds-phase ($\Delta=50$ МэВ, $T_c= 2.3 \cdot 10^{11}$ К)

Кривые остывания с учетом кварковой цветной сверхпроводимости $\rho_b = 3\rho_0$



Основной вклад в остывание при $T < T_c$: электронная составляющая вещества звезды.

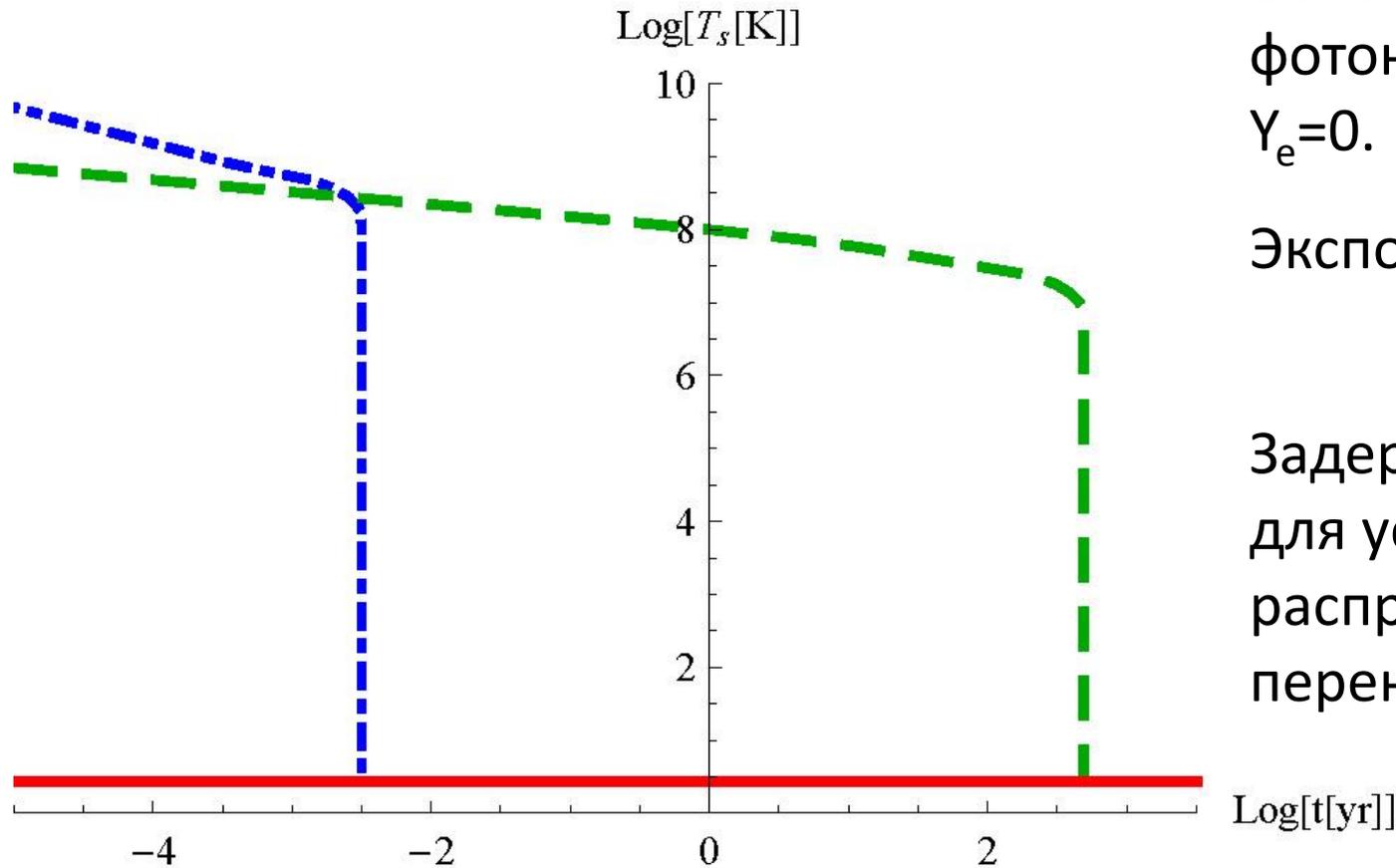
$$t_{min} \sim 10^9 \text{ yr}$$

$$t_{Universe} = 1.4 \cdot 10^{10} \text{ yr}$$

Температура звезды сравнивается с температурой реликта за время, меньшее возраста Вселенной

Кривые остывания странной кварковой звезды без оболочки **без учета** и **с учетом кварковой цветной сверхпроводимости**. $T_s = 2.7 \text{ K}$ – **красный**. $\Delta = 0.1 \text{ МэВ}$

Кривые остывания с учетом кварковой цветной сверхпроводимости $\rho_b = 5\rho_0$



Основной вклад в остывание при $T < T_c$: фотон-глюонная составляющая, так как $Y_e = 0$.

Экспоненциально быстрое охлаждение
 $T(t) \sim \exp[-at]$

Задержка по времени для достижения T_c , для установления квазистационарного распределения температуры и за счет переноса тепла в оболочке:

$$t_{min} \sim 10^2 - 10^3 \text{ yr}$$

Кривые остывания странной кварковой звезды **без оболочки** и **с оболочкой** с учетом кварковой цветной сверхпроводимости. $T_c = 2.7 \text{ K}$ – **красный**. $\Delta = 0.1 \text{ МэВ}$

Состав Вселенной. Холодные странные кварковые звезды - составляющие темной материи?

- Обычная материя ~5 %
- Неизвестное вещество ~95%

Темная материя: не излучает и обнаруживается только по гравитационному взаимодействию

Странная кварковая звезда стабильна

Быстро остынет при условии существования кварковой цветной сверхпроводимости (фаза CFL или small gaps) в СКМ в её ядре

При температуре реликта будет не видна на его фоне



Квазиядра в космических лучах. Эксперимент АДРОН

Странные кварковые звезды нашей Галактики – источник квазиядер, гипотетических стабильных частиц, состоящих из u-, d-, s- кварков.

Квазиядра в космических лучах могут объяснить наблюдаемые экспериментально аномалии.

Эксперимент АДРОН на Тянь-Шане (685 г/см^2): эффекты уменьшения наклона адронных спектров при первичных энергиях $E_0=3\text{-}20 \text{ ПэВ}$ и избыток мюонов в ШАЛ, образованных протонами при тех же энергиях.

Возможное объяснение – неядерная компонента в космических лучах при энергиях в несколько ПэВ.

Экспериментальное определение величины потока квазиядер в космических лучах – источник информации о количестве странных звезд в нашей Галактике и их вкладе в темную материю.

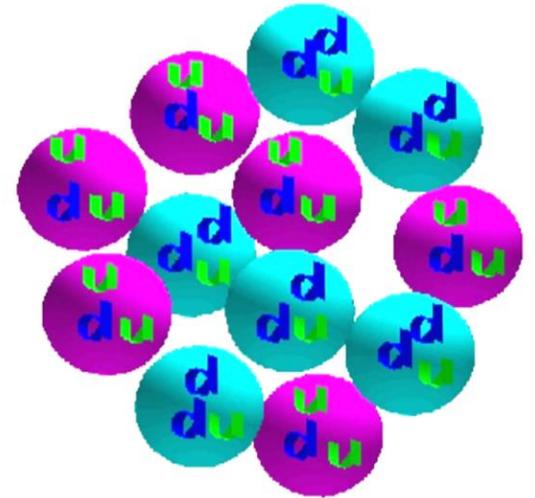
Выводы

- В результате оценок в рамках простой модели самое быстрое остывание ожидается для странной кварковой звезды с высокой плотностью барионной материи (соответствует большой массе звезды) при условии существования кварковой цветной сверхпроводимости (фаза CFL или small gaps) в СКМ в её ядре.
- Время остывания может быть очень малым, что позволит звездам, дошедшим до стадии странной кварковой звезды, быстро стать «невидимыми» по сравнению с реликтовым фоном.
- Потенциальное существование достаточно большого количества холодных «невидимых на реликтовом фоне» странных кварковых звезд открывает интересные возможности для дальнейших исследований.

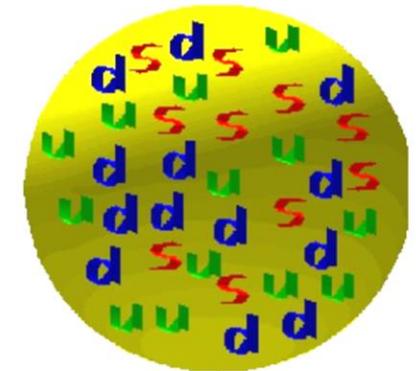
Спасибо за внимание!

Кварковая материя

- Квазисвободные кварки.
- Когда говорят о кварковой материи, обычно имеют в виду ферми-газ, заполняющий некоторый объем (мешок) V и состоящий из $3 \cdot A$ кварков. Эти кварки образуют единый бесцветный барион с барионным числом A . Волновые функции кварков распределены по всему объему V .
- В модели ферми-газа кварки заполняют все состояния вплоть до энергии Ферми E_f , которая при ядерной плотности составляет $E_f \sim 300$ МэВ. Если масса странного кварка $m_s < E_f$, энергетически выгодно перевести u-, d-кварки, занимающие состояния вблизи границы Ферми, в s-кварки в состояниях с существенно более низкими значениями импульса.
- Модель ферми-газа для $A > 100$ и кваркового мешка для меньших значений барионного числа.
- Виттен 1984 – стабильная странная кварковая материя.



Ядра



Странная кварковая материя

Свойства странной кварковой материи

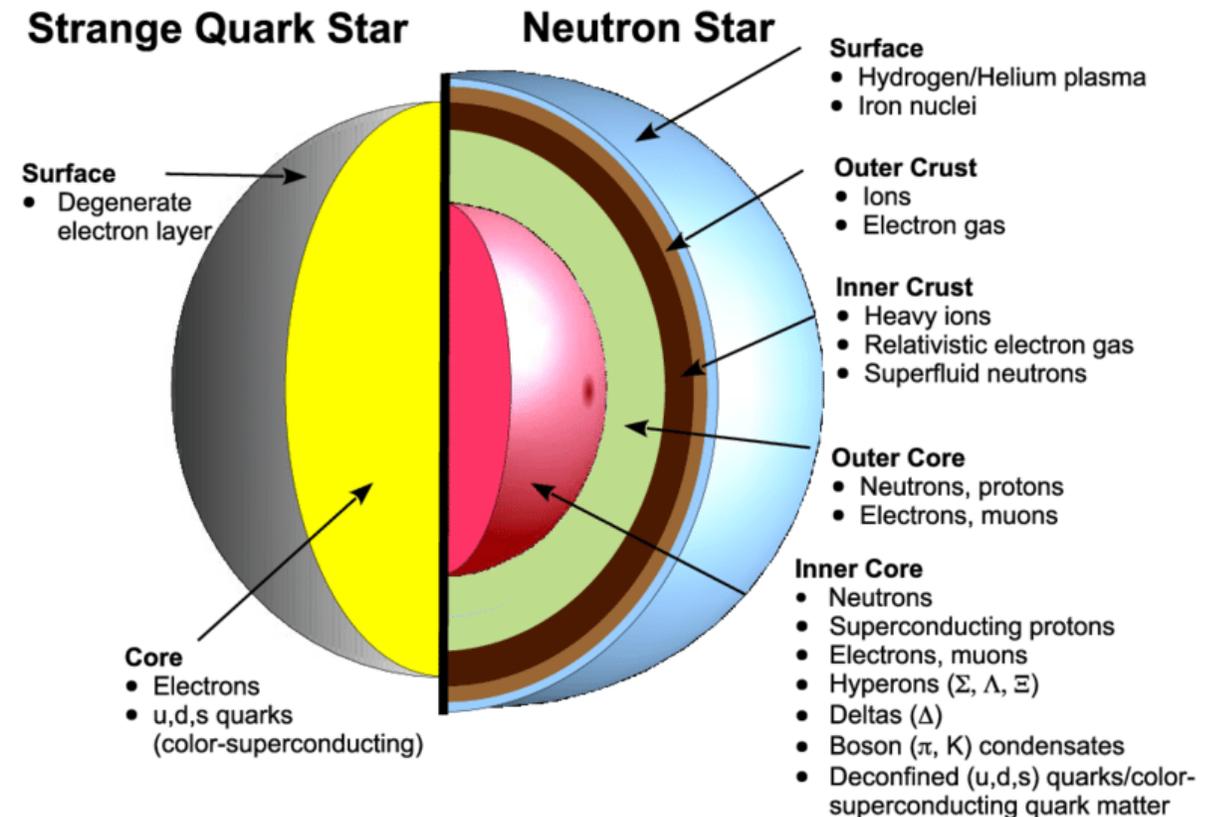
- Состоит из примерно равного количества u , d , s кварков и некоторого (меньшего) количества электронов для зарядовой нейтральности
- Стабильна в достаточном объеме
- На барионное число A приходится меньше энергии, чем в обычных ядрах (E/A)
- Плотность кварковой материи сравнима с плотностью обычной ядерной материи
- Может образовывать капли размером от нескольких ферми до звездных, порядка 10 км
- Возможно, странная материя является основным состоянием ядерного вещества
- Существует некоторое минимальное значение A , ниже которого странная материя нестабильна. Это значение A зависит от выбора параметров и лежит в диапазоне 10–1000. Ограничения сверху по A практически нет
- Нейтроны могут без ограничений адсорбироваться каплей странной материи

Механизмы перехода в странную кварковую материю

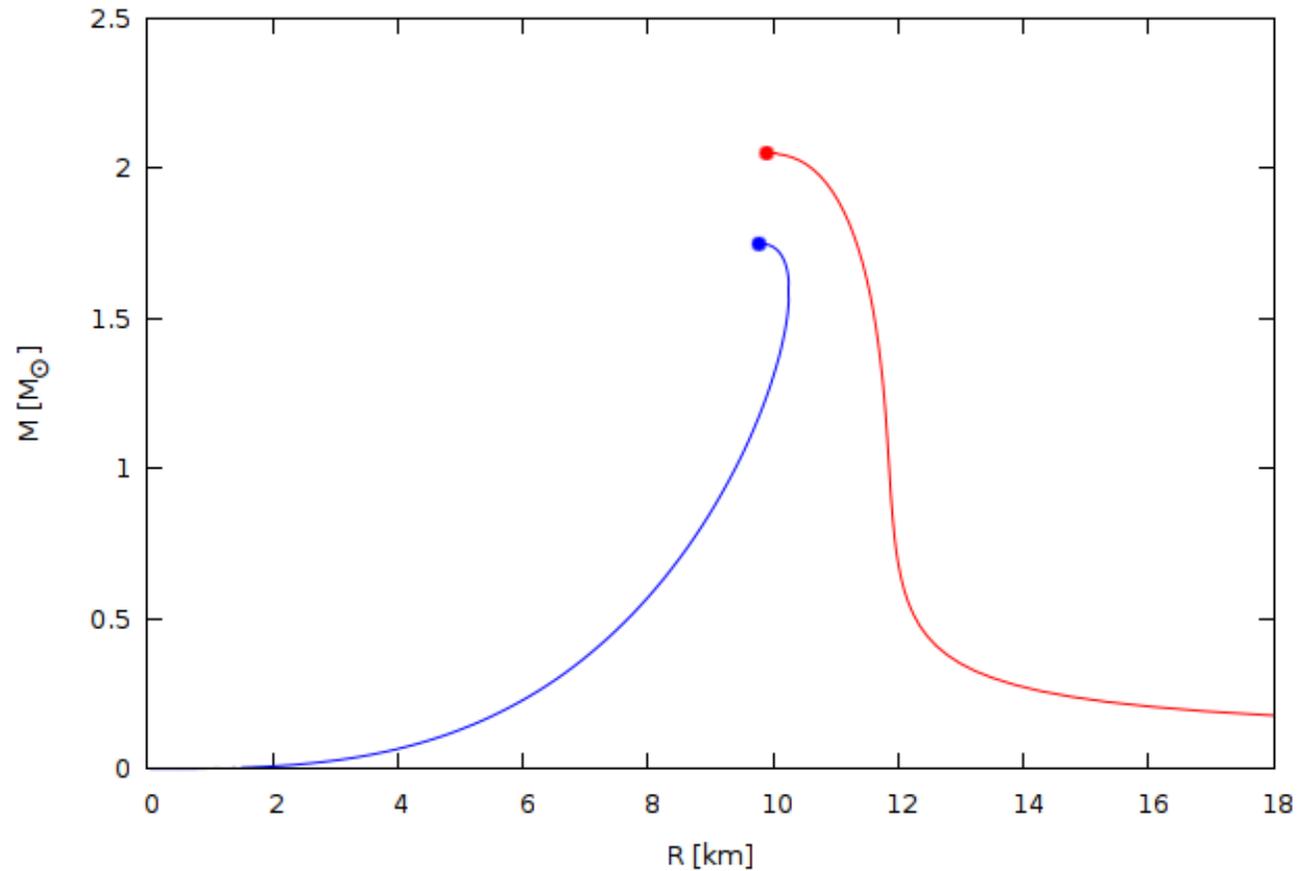
- Спонтанно с помощью слабого взаимодействия: вероятность близка к нулю. Последовательный распад $u \rightarrow s + e^+ + \nu$ или $u + d \rightarrow u + s$ энергетически запрещен. Одновременное же превращение примерно $1/3$ всех кварков в странные является слабым процессом высокого ($\sim A$) порядка.
- Через фазовый переход при остывании Вселенной после Большого взрыва. $T_c \sim (100-200)$ МэВ.
- Под действием сильного давления и высоких температур из обычной ядерной материи, например внутри нейтронных звезд

Свойства странных кварковых звезд. Отличие от нейтронных

- Свойства странных кварковых звезд сильно отличаются от нейтронных. В частности, масса кварковых звезд должна расти с ростом радиуса, в то время как у нейтронных звезд радиус падает с ростом массы.
- *Остывание для кварковых звезд быстрое; быстрее, чем для нейтронных звезд*



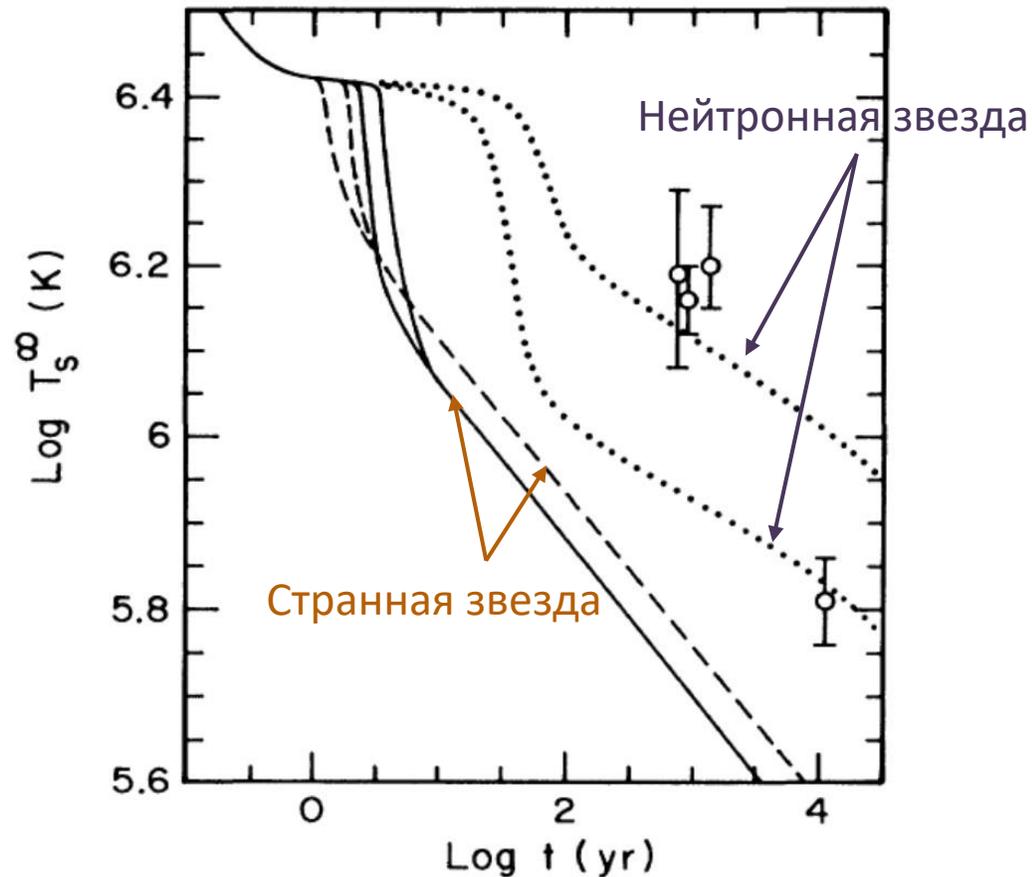
Свойства странных кварковых звезд. Отличие от нейтронных



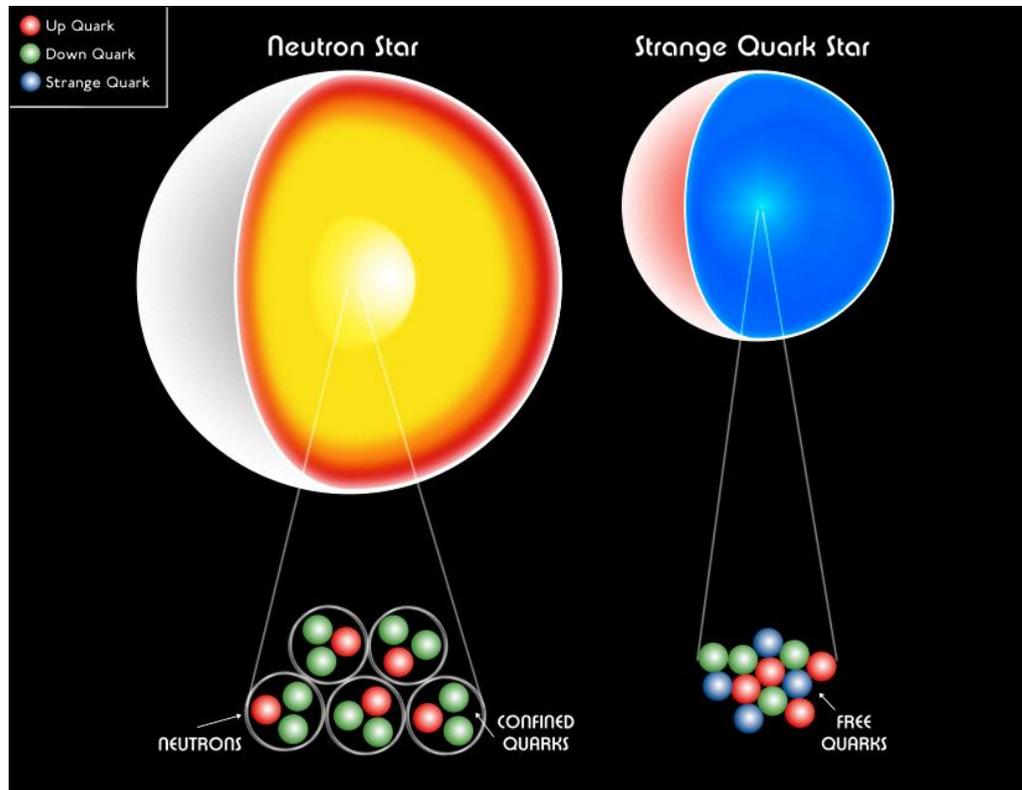
Соотношения массы и радиуса для нейтронной звезды (красный) и кварковой звезды (синий)

Сравнение с нейтронными

Странные звезды будут охлаждаться быстрее, чем нейтронные звезды в рамках большинства моделей



Механизмы образования кварковых звезд из нейтронных



1. В ядре нейтронных звезд давление:
 - может способствовать образованию кварковой материи из двух ароматов (ud -материя), которая легко преобразуется в странную кварковую материю
 - приводит к образованию Λ -гиперонов, которые собираются в кластеры
2. Может произойти «сгорание» нейтронов с переходом в странную кварковую материю
3. Переход под действием высокоэнергичного нейтрино из космических лучей
4. Переход при столкновении со сгустком странной кварковой материи извне

Остывание странной звезды

Основной путь эволюции странной кварковой звезды – ее остывание.

Разные процессы в странной кварковой материи влияют на остывание: цветная сверхпроводимость.

Чаще всего интересует медленное остывание для описания экспериментальных данных по мягким рентгеновским лучам: Einstein X-ray Observatory experiment, EXOSAT, ROSAT, ASCA.

Выясним, какая модель звезды дает самое быстрое остывание? Покажем возможность очень быстрого остывания и интересные следствия этого.

Время остывания

Время остывания до температуры фонового реликтового излучения

$$T_s = T_{\text{CMB}} = 2.7 \text{ К:}$$

- при *наличии тонкой оболочки* из обычного вещества и невысокой плотности барионной материи $\rho_b = 3\rho_0$:
 $t \sim 10^{16} \text{ yr}$,
при плотности барионной материи $\rho_b = 5\rho_0$:
 $t \sim 10^{16} \text{ yr}$
- при *отсутствии оболочки* и невысокой плотности барионной материи $\rho_b = 3\rho_0$:
 $t \sim 10^{13} \text{ yr}$
при плотности барионной материи $\rho_b = 5\rho_0$:
 $t \sim 10^{14} \text{ yr}$
 $t_{\text{Universe}} = 1.4 \cdot 10^{10} \text{ yr}$

Время остывания с учетом кварковой цветной сверхпроводимости

Время остывания до температуры реликта $T_s = T_{\text{CMB}} = 2.7 \text{ K}$:

- при наличии *тонкой оболочки* из обычного вещества и невысокой плотности барионной материи $\rho_b = 3\rho_0$:

$$t \sim 10^{12} \text{ yr},$$

при плотности барионной материи $\rho_b = 5\rho_0$:

exp быстро

- при *отсутствии оболочки* и невысокой плотности барионной материи $\rho_b = 3\rho_0$:

$$t \sim 10^9 \text{ yr}$$

при плотности барионной материи $\rho_b = 5\rho_0$:

exp быстро

$$t_{\text{Universe}} = 1.4 \cdot 10^{10} \text{ yr}$$