

СТРАННЫЕ, КВАРКОВЫЕ И МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Криворученко М.И.

Получены ограничения на энергию связи стабильной странной кварковой материи. Рассмотрены наблюдательные следствия возможного существования странных, кварковых и метастабильных нейтронных звезд. Учтена возможность бозе-конденсации дибарионов в плотной ядерной материи.

Внутри массивных нейтронных звезд при больших давлениях энергетически выгодным становится рождение странных барионов ¹. Виттенем ² было отмечено, что странная кварковая материя (СКМ) может быть стабильной при нулевой температуре и нулевом внешнем давлении. Мы получим ограничения на энергию связи стабильной СКМ и рассмотрим наблюдательные следствия возможного существования странных звезд ²⁻⁴, составленных из стабильной СКМ, и кварковых звезд, внутренняя часть которых состоит из слабонесвязанной СКМ, а внешняя оболочка – из обычной адронной материи.

Странные звезды не могут испытывать сбоев в периодах вращения ³. Если СКМ стабильна, то пульсары, у которых наблюдаются сбои, должны быть отождествлены с нейтронными звездами, метастабильными относительно конверсии в странные звезды или черные дыры. Время жизни метастабильных нейтронных звезд велико, так как для образования зародыша СКМ критического размера требуется когерентное рождение большого числа странных кварков ².

Центральная плотность метастабильных нейтронных звезд должна быть ниже критической плотности фазового перехода в нестранную кварковую материю (НКМ). Это условие можно записать в виде

$$B > \frac{\mu^4}{4\pi^2(1+2^{4/3})^3} \left(1 - \frac{2\alpha_c}{\pi}\right) - P. \quad (1)$$

Здесь μ, P — химический потенциал и давление нейтронов в центре звезды, B — давление КХД-вакуума, α_c — КХД константа связи.

У пульсара в Крабовидной туманности сбой повторяются через $\Delta t \cong 5$ лет. Возраст пульсара $T = 930$ лет. Время жизни ядер $T_{\text{яд}}$ относительно распада в СКМ в M_{\odot}/m (${}^{56}\text{Fe}$) раз больше времени жизни метастабильных нейтронных звезд, поэтому $T_{\text{яд}} \geq 10^{60}$ лет. Чувствительность земных детекторов $\sim 10^{30}$ лет не достаточна, чтобы наблюдать данные распады. В модели тензорного взаимодействия $\Delta t = 5$ лет при $\mu = 1088$ МэВ, $P = 21$ МэВ \cdot Фм $^{-3}$, $M = 1,3 M_{\odot}$, где M — масса пульсара. Из соотношения (1) находим $B > (85 - 67 \alpha_c)$ МэВ \cdot Фм $^{-3}$. Для массы странного кварка $m_s = 150$ МэВ энергия стабильной СКМ на единицу барионного числа $E/A > m + (18 - 59 \alpha_c)$ МэВ, где m — масса нуклона. Энергия связи стабильной СКМ, по-видимому, не может быть больше 30 — 40 МэВ.

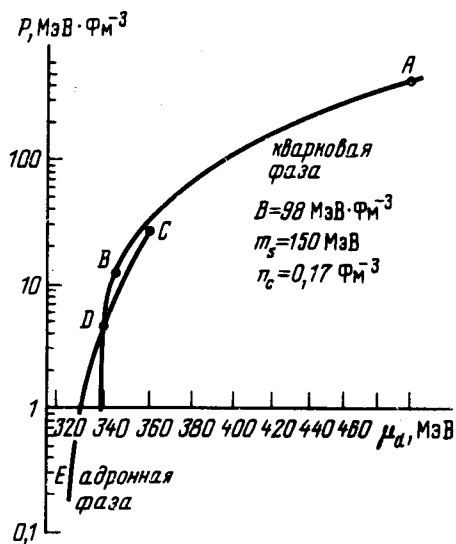


Рис. 1

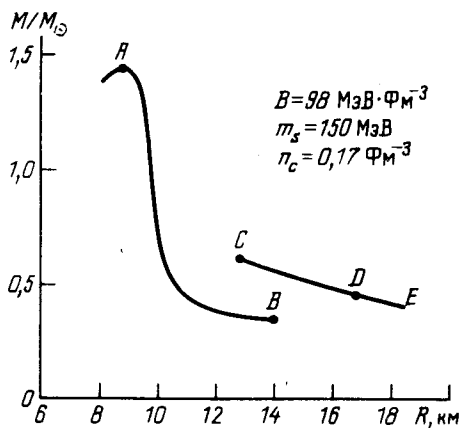


Рис. 2

Рис. 1. Давление в кварковой (ABD) фазе за вычетом давления КХД-вакуума $B = 98$ МэВ \cdot Фм $^{-3}$ и давление в адронной (CDE) фазе как функция химического потенциала d -кварков для $m_s = 150$ МэВ и критической плотности фазового перехода в СКМ $n_c = 0,17$ Фм $^{-3}$. Точки A, B отвечают состоянию СКМ в центре кварковых звезд с максимальной и минимальной массами (см. рис. 2). На отрезке BD не существует гравитационно устойчивых кварковых звезд

Рис. 2. Зависимость масс кварковых и нейтронных звезд от радиуса. Обозначения те же, что на рис. 1. AB, CDE — ветви гравитационно устойчивых кварковых и нейтронных звезд, CD — долгоживущие метастабильные нейтронные звезды

Скорость роста СКМ в ядерной материи с температурой $T = 10$ МэВ $v = 10 - 6 \cdot 10^3$ см/с 4 . Большим значением E/A отвечают меньшие значения v . Время конверсии метастабильной нейтронной звезды можно оценить как $t \sim 10$ км/ $v = 0,05 - 30$ час. Конверсия нейтронной звезды с массой, превышающей максимальную массу странных звезд $\bar{M} \cong 2M_{\odot}$, завершается коллапсом ядра СКМ. В результате коллапса обычной звезды может образоваться гравитационно устойчивая нейтронная звезда с $M > \bar{M}$, содержащая примесь СКМ. В этом случае через $t \sim 10$ км/ $v =$

$\approx 0,05 - 30$ час должен произойти второй коллапс. СКМ в нейтронной звезде может образоваться, например, через промежуточный фазовый переход в НКМ. Два нейтринных всплеска, которые были зарегистрированы с интервалом в несколько часов во время вспышки сверхновой SN 1987 A⁶, могут быть отождествлены с коллапсом обычной звезды и коллапсом ядра СКМ метастабильной нейтронной звезды.

Странные звезды могут иметь произвольно малый радиус²⁻⁴. Минимальный радиус нейтронных и кварковых звезд $R \approx 10$ км (см. рис. 2), их период вращения должен быть больше $P_1 \sim \sim 2\pi R/c = 0,2$ мс. Известны радиопульсары с периодами $P \approx 1 - 10^4$ мс. Обнаружение пульсара с периодом $P < P_1$ явилось бы прямым доказательством существования странных звезд. Поиски пульсаров с ультракороткими периодами представляют исключительно большой интерес.

Мы рассмотрим модель кварковых звезд, которая является простейшей модификацией странных звезд Виттена². Адронную фазу материи мы описываем вырожденным идеальным ферми-газом нейтронов, протонов и электронов, кварковую фазу — вырожденным идеальным ($\alpha_c = 0$) ферми-газом u -, d -, s -кварков и электронов. Область применимости такой модели должна быть ограничена невысокими критическими плотностями фазового перехода⁷, что эквивалентно условию слабой несвязанности СКМ. Зависимость давления в адронной и кварковой фазах от химического потенциала d -кварков показана на рис. 1. При $\mu_d > \mu_d^D = 338$ МэВ адронная фаза является метастабильной. При $\mu_d = \mu_d^C$ двум нуклонам энергетически выгодно сойти с ферми-поверхности, слившись в bq -мешок. Увеличение плотности адронной материи ведет к образованию дибарионного бозе-конденсата. Дибарионы не дают вклада в давление, так как имеют нулевой импульс, поэтому давление при увеличении плотности не растет. Адронная материя теряет упругость. Устойчивых нейтронных звезд с дибарионным бозе-конденсатом не существует. Если ограничиться наиболее надежно установленными дибарионными резонансами, то первым будет конденсироваться $\Lambda N(2130)$, $I, J^P = 1/2, 1^+$ ⁸ при $\mu_d = \mu_d^C = 360$ МэВ. Зависимость массы от радиуса кварковых и нейтронных звезд показана на рис. 2. Максимальная масса нейтронных звезд, определяемая бозе-конденсацией $\Lambda N(2130)$, меньше ОВ предела.

Если пренебречь взаимодействием дибарионов с нейтронами и друг с другом, то из условия что пульсар в Крабовидной туманности — нейтронная звезда, следует, что массы дибарионов должны быть больше, чем $m(6q)^{min} = 2\mu = 2176$ МэВ. С приемлемой точностью можно считать, что резонанс $\Lambda N(2130)$ удовлетворяет данному ограничению. Условие $m(6q) > 2176$ МэВ ставит под сомнение существование резонанса $N N(1960)$ ⁸. Дибарион с такой массой должен был бы конденсироваться при плотности $n \approx 0,1$ Фм⁻³, которая меньше той, что существует в обычных ядрах.

В результате конверсии метастабильной нейтронной звезды в кварковую или странную звезду изменяется характеристический возраст пульсара. В старом остатке сверхновой MSH 15-52 ($\tau_{ост} = 2 \cdot 10^4$ лет) находится молодой пульсар PSR 1509 - 58 ($\tau_{хар} = 1,7 \cdot 10^3$ лет) Возраст пульсара может быть согласован с возрастом туманности, если предположить, что после взрыва сверхновой образовалась метастабильная нейтронная звезда, которая $\approx 1,7 \cdot 10^3$ лет назад спонтанно конвертировалась в кварковую или странную звезду.

Автор благодарит С.И.Блинникова, М.Б.Волошина, В.И.Захарова, И.Ю.Кобзарева, Л.А.Кондратюка, И.М.Народецкого, Л.Б.Окуня, К.Г.Селиванова, М.А.Шифмана за полезные обсуждения и Я.Б.Зельдовича за ценные замечания.

Литература

1. Амбарцумян В.А., Саакян Г.С. АЖ, 1960, 37, 193.
2. Witten E. Phys. Rev., 1984, D30, 272.
3. Alcock C., Farhi E., Olinto A. Ap.J., 1986, 310, 261.
4. Olinto A. Preprint CTP-1424, December 1986.

5. *Pandharipande V.R., Pines D., Smith R.A.* *Astrophys. J.*, 1976, **208**, 550.
6. *Castagnoli C.* *IAU Circ.*, 1987, No. 4323; No. 4332; *Hirata K. et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**, 1490.
7. *Зельдович Я.Б.* *УФН*, 1965, **86**, 303.
8. *Particle Data Group.* *Phys. Lett.*, 1986, **170B**.

Институт теоретической
и экспериментальной физики

Поступила в редакцию
13 мая 1987 г.
