

Остывание нейтронных звезд

11.1. ВВЕДЕНИЕ

Определение поверхностной температуры нейтронных звезд путем регистрации теплового чернотельного излучения может в принципе дать существенную информацию о внутреннем адронном веществе и о структуре нейтронной звезды. (Мы изучали аналогичную ситуацию для белых карликов в гл. 4.) Например, современный верхний предел $2 \cdot 10^6$ К для поверхностной температуры пульсара в Крабовидной туманности налагает строгое ограничение на историю тепловой эволюции нейтронной звезды в первые 930 лет после ее образования. Знание тепловой эволюции нейтронной звезды дает также информацию о таких чувствительных к температуре свойствах, как коэффициенты переноса, переход к сверхтекучему состоянию, затвердевание коры, о внутренних механизмах нагрева пульсара, таких как фрикционная диссипация в местах сопряжения коры со сверхтекучей жидкостью и т.д.

Обычно считается, что нейтронные звезды образуются при очень высоких внутренних температурах ($T \geq 10^{11}$ К) в ядре взрыва сверхновой (ср. с гл. 1 и 18). Преобладающий механизм охлаждения сразу же после образования состоит в испускании нейтрино, причем вначале характерное время остывания имеет величину порядка секунд. Примерно через сутки внутренняя температура падает до $10^9 - 10^{10}$ К. Излучение фотонов начинает превосходить по интенсивности излучение нейтрино, лишь когда внутренняя температура упадет до $\sim 10^8$ К, а соответствующая температура поверхности будет при этом приблизительно на два порядка меньше. Охлаждение путем испускания нейтрино преобладает *по крайней мере* первые 10^3 лет, а согласно выполненным недавно стандартным расчетам остывания, и гораздо дольше. Эти теоретические расчеты (см., например, [226, 420, 590]) дают кривые поверхностной температуры нейтронной звезды в зависимости от времени, которые в принципе поддаются наблюдательной проверке.

Расчеты тепловой эволюции чувствительны к принятому ядерному уравнению состояния, массе нейтронной звезды, предполагаемой напряженности магнитного поля, возможному существованию сверхтекучести, пионной конденсации, кваркового вещества и т.д. Если рассматривать все эти возможности, возникает широкий диапазон сценариев тепловой эволюции.

В типичных случаях находят, что поверхностная температура падает до нескольких миллионов кельвинов для объектов с возрастом около 300 лет и остается вблизи $(0,5 + 2) \cdot 10^6$ К в течение по крайней мере 10^4 лет. Такие температуры свидетельствуют о потенциальной возможности обнаружения

излучения фотонов в мягком рентгеновском диапазоне (0,2—3 кэВ). Действительно, еще до открытия пульсаров считалось, что среди первых обнаруженных дискретных рентгеновских источников могут быть молодые нейтронные звезды (см., например [126, 127]). Поэтому в ожидании таких наблюдений были составлены детальные кривые остывания [577] и подробно вычислены скорости остывания [44].

Источники рентгеновского излучения, связанные с нейтронными звездами, стали наблюдаться только после открытия пульсаров. Однако эти источники были не изолированными нейтронными звездами, остывающими после образования, а нейтронными звездами в двойных системах, аккрецирующими газ от своих компаньонов (сравните с гл. 13). В таких системах именно падающий газ служит источником рентгеновского излучения. Многие годы единственным наблюдательным ограничением, касающимся процесса охлаждения изолированной нейтронной звезды посредством рентгеновского излучения, был верхний предел порядка $3 \cdot 10^6$ К для поверхностной температуры пульсара в Крабовидной туманности, полученный при измерениях, которые проводились во время покрытия пульсара Луной (пульсар в Крабовидной туманности излучает рентгеновские импульсы с той же частотой, что и радиоимпульсы, но они не имеют ничего общего с тепловыми свойствами пульсара).

Недавно появилась возможность значительно расширить пределы наблюдений благодаря тысячекратному увеличению чувствительности и отличному угловому разрешению, обеспеченными выводом на орбиту обсерватории «Эйнштейн» (спутник HEAO-2). Характеристики такого спутника позволяют при изучении близлежащих остатков сверхновых либо обнаружить точечные источники, либо получить верхние пределы поверхностных температур почти на порядок величины ниже, чем при прежних измерениях [271]. В результате данные, поступающие от обсерватории «Эйнштейн» и от ее приемников, возможно, позволят определить, существуют ли действительно в недрах нейтронных звезд пионные конденсаты или свободные кварки. (Как мы увидим, эти состояния заметно ускоряют остывание.) Вдохновленные этой перспективой и накопленными к настоящему времени данными, мы обсудим ниже физику остывания нейтронной звезды.

11.2. РЕАКЦИИ С ИЗЛУЧЕНИЕМ НЕЙТРИНО В НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗДАХ ($T \lesssim 10^9$ К)

Здесь нас интересует история тепловой эволюции нейтронной звезды *после* того, как она уже остыла до температуры недр ниже нескольких миллиардов кельвинов. Относительно короткую эпоху, в течение которой температура падает от $\sim 10^{11}$ К до $\sim 10^9$ К, мы обсудим в гл. 18. Эта более ранняя эпоха, начинающаяся коллапсом звездного ядра и взрывом сверхновой, значительно короче, чем длительный период остывания при температурах ниже 10^9 К.