

Модели нейтронных звезд: массы и радиусы

В этой главе мы обсудим равновесные модели нейтронных звезд. «Холодные» модели без учета вращения получаются на основе уравнения гидростатического равновесия Оппенгеймера — Волкова, т.е. уравнения (5.7.6) для конкретного уравнения состояния $P = P(\rho)$. Можно создать последовательность моделей с параметром ρ_c ; модели, для которых $dM/d\rho_c > 0$, устойчивы в данном диапазоне плотностей, а модели с $dM/d\rho_c < 0$ неустойчивы (сравните с разд. 6.8 и 6.9).

Основная неопределенность в моделях нейтронных звезд связана с уравнением состояния ядерного вещества, особенно при плотностях выше ядерной (напоминаем, что $\rho_{\text{ядр}} = 2,8 \cdot 10^{14}$ г/см³). Как отмечалось в гл. 8, несмотря на достигнутый в последние годы значительный прогресс, еще остается несколько вопросов, ждущих своего решения. Тем не менее интересно, что наше современное понимание природы конденсированного вещества, как мы увидим позднее, достаточно для того, чтобы наложить довольно строгие ограничения на массы устойчивых нейтронных звезд.

Результаты оценок масс и радиусов белых карликов из наблюдений используются для подтверждения астрофизических моделей (см. разд. 3.6). В то же время наблюдательные данные о массах и радиусах нейтронных звезд с учетом неопределенностей в уравнении состояния применяются даже для проверки теорий ядерной физики.

9.1. НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ: ИСТОРИЯ ИДЕИ И ОТКРЫТИЯ

В 1934 г. Бааде и Цвикки предложили идею нейтронных звезд — объектов с очень высокой плотностью и малыми радиусами, для которых гравитационная связь выражена гораздо сильнее, нежели для обычных звезд. Бааде и Цвикки высказали также поистине пророческую мысль, что нейтронные звезды образуются при взрывах сверхновых¹⁾.

¹⁾ Бааде и Цвикки [31] в 1934 г. писали: «Со всеми соответствующими оговорками мы выдвигаем точку зрения, что сверхновые представляют собой переходную стадию от обычных звезд к *нейтронным звездам*, которые в конечной стадии состоят из исключительно плотно упакованных нейтронов».

Как вспоминает Розенфельд [487], еще раньше, в 1932 г., когда в Копенгаген пришло из Кембриджа сообщение об открытии Чедвиком нейтрона, он вместе с Бором и Ландау провели вечер, обсуждая возможные следствия этого открытия. Именно тогда Ландау предположил возможность существования холодных, плотных звезд, состоящих преимущественно из нейтронов. Единственная публикация Ландау по этому вопросу была посвящена нейтронным ядрам звезд [338].

Первые вычисления моделей нейтронных звезд были выполнены Оппенгеймером и Волковым [427], которые предположили, что вещество должно состоять из идеального газа свободных нейтронов с высокой плотностью. Большинство работ по нейтронным звездам в то время основывалось на идее, что нейтронные ядра нормальных массивных звезд являются источниками звездной энергии. Когда стали понятными детали процесса термоядерного синтеза, от этой идеи пришлось отказаться и нейтронные звезды в течение последующих тридцати лет в основном игнорировались астрономами. Правда, такое отношение к ним было отнюдь не всеобщим. Например, в работах [12, 100, 255, 260] подробно рассматривались уравнения состояния и модели нейтронных звезд, а в книге [261] приводилось пространное обсуждение этого вопроса. Пренебрежение идеей нейтронных звезд нередко объяснялось тем, что из-за малой площади поверхности нейтронных звезд их остаточное тепловое излучение должно быть слишком слабым для наблюдений на астрономических расстояниях с помощью оптических телескопов.

Однако открытие в 1962 г. космических рентгеновских источников вне-солнечного происхождения [223] вызвало резкий подъем интереса к нейтронным звездам. Многие теоретики независимо друг от друга предположили, что рентгеновский телескоп наблюдал молодую, теплую нейтронную звезду, и поспешно начали расчеты остывания нейтронных звезд¹⁾. Отождествление первого «квазизвездного объекта» (квазара) Шмидтом в Паломарской обсерватории в 1963 г. стимулировало дальнейший интерес к нейтронным звездам. Этот интерес порождался предположением, что большие красные смещения, наблюдаемые в спектрах квазаров²⁾, могут быть вызваны гравитационным красным смещением на поверхности компактного объекта. Аргументы, показывающие³⁾, что наибольшее красное смещение, наблюдаемое у квазаров, превосходит максимально возможное красное смещение в спектре устойчивой нейтронной звезды, вскоре рассеяли всякую предполагаемую связь между квазарами и (изолированными) нейтронными звездами.

Во всяком случае, после открытия рентгеновских источников и квазаров десятки теоретиков сосредоточили свое внимание на равновесных свойствах компактных звезд и на звездном коллапсе. Однако, несмотря на растущие теоретические успехи, большинство физиков и астрономов не принимали всерьез возможности существования нейтронных звезд (не говоря уже о черных дырах!). Возможно, необходимость столь огромной экстраполяции от хорошо знакомой физики была наиболее важным фактором, определившим их позицию!

¹⁾ Этому вопросу посвящена гл. 11.

²⁾ Первый квазар, отождествленный Шмидтом — 3C 273, имел беспрецедентное для нормальной звезды красное смещение $\delta\lambda/\lambda = 0,158$.

³⁾ В дополнение к этому аргументу имелись серьезные свидетельства, что красные смещения квазаров по своей природе являются космологическими [498].

Положение резко изменилось, когда в конце 1967 г. были открыты пульсары [274]. Голд высказал предположение [227], что они представляют собой вращающиеся нейтронные звезды, и сейчас эта интерпретация общепринята (см. гл. 10).

С 1968 г. было опубликовано много теоретических работ по свойствам нейтронных звезд. Еще больше стимулировало исследования открытие спутником «Ухуру» в 1971 г. пульсирующих компактных рентгеновских источников («рентгеновских пульсаров»). Как полагают, эти источники представляют собой нейтронные звезды, входящие в тесную двойную систему и аккрецирующие газ от своего нормального звездного компаньона. Хотя идея двойных систем с аккрецией предлагалась и ранее для объяснения природы рентгеновских источников, первое убедительное доказательство периодичности было найдено в источниках Центавр X-3 и Геркулес X-1 [312, 537].

Почти одновременное открытие поздней осенью 1968 г. пульсаров в Крабовидной туманности [137, 481, 550] и в созвездии Парусов [345], которые оба расположены в остатках сверхновых, послужило свидетельством образования нейтронных звезд при взрывах сверхновых. Крабовидная туманность, например, является остатком сверхновой, наблюдавшейся китайскими астрономами в 1054 г. н.э.¹⁾

Оптические и рентгеновские наблюдения рентгеновских источников, входящих в двойные системы, позволили определить массы нейтронных звезд в некоторых из этих систем. Открытие Халсом и Тейлором [287] первого пульсара в двойной системе также дает возможность измерения массы нейтронной звезды и, как мы увидим позднее, проверки существования гравитационного излучения.

Когда писалась эта книга, было известно около 350 пульсаров, три из которых входят в двойные системы. Известно свыше 300 компактных рентгеновских источников, примерно 19 из которых показывают периодичность и, по-видимому, входят в двойные системы.

9.2. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В ЯДЕРНОЙ ОБЛАСТИ

Первое приближение в исследовании внутреннего строения нейтронной звезды обеспечивается предположением, что вырожденный газ состоит из невзаимодействующих частиц. В самом деле, аргументация Ландау, приведенная в разд. 3.4, предполагает идеальный вырожденный газ нейтронов и дает значение $M_{\max} \sim 1,5 M_0$ при $R \sim 3$ км для максимальной массы нейтронной звезды и соответствующего радиуса. В этом разделе мы рассмотрим свойства нейтронного газа, основанные на последовательно усложняе-

¹⁾ Бааде [30], Минковский [410] и другие [174, 391] отождествили «южную звезду» вблизи центра Крабовидной туманности как вероятный (сколлапсировавший) остаток звезды, взорвавшейся в 1054 г.