

Атмосферы и спектры излучения нейтронных звезд

А. Ю. Потехин

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Нейтронные звезды можно рассматривать как природные лаборатории для изучения вещества при экстремальных физических условиях. Это самые компактные звезды во Вселенной: при массе M порядка массы Солнца $M_{\odot} \approx 2 \times 10^{33} \text{ g cm}^{-3}$ (в типичных случаях $M \approx 1,4 M_{\odot}$) их радиус составляет лишь 10–15 км (примерно в 50 000 раз меньше солнечного). Вследствие этого плотность вещества в ядрах нейтронных звезд в несколько раз превосходит типичную плотность атомных ядер $\rho_0 \approx 2,8 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$. Гравитационное ускорение на поверхности такой звезды $g \sim 10^{14} \text{ cm s}^{-2}$, а гравитационная энергия связи $U \sim 10^{53} - 10^{54} \text{ erg}$ составляет $\sim 20\%$ от энергии покоя Mc^2 . Это делает весьма заметными эффекты общей теории относительности, поэтому наиболее впечатляющие проверки теории относительности в последнее время связаны именно с наблюдениями нейтронных звезд. Но, пожалуй, наибольший интерес с точки зрения фундаментальной физики вызывает возможность проверки теоретических моделей сверхплотной материи путем сравнения результатов наблюдений нейтронных звезд с предсказаниями, сделанными на основе тех или иных теоретических моделей взаимодействий элементарных частиц. В частности, в центральных областях нейтронной звезды могут присутствовать такие экзотические образования, как π - или K -мезонный конденсат или кварковая материя (см. схему строения нейтронной звезды на рис. 1). Таким образом, в исследованиях нейтронных звезд астрофизика смыкается с физической элементарных частиц и многочастичных взаимодействий.

Понятно, однако, что внутренние области звезды не наблюдаются непосредственно. Для их изучения требуется надежно интерпретировать излучение от нейтронной звезды, которое регистрирует земной наблюдатель, — в частности, *тепловое излучение с поверхности*.

Следует отметить, что большинство известных нейтронных звезд обладают магнитными полями $B \sim 10^{12} - 10^{13} \text{ G}$, недостижимыми в лабораторных условиях. Такие поля существенно влияют на свойства вещества во внешних слоях нейтронной звезды и, следовательно, на свойства излучения, которое формируется в тонкой атмосфере (рис. 1) при типичных эффективных температурах $T \sim 3 \times (10^5 - 10^6) \text{ K}$ и плотностях $\rho \sim 10^{-3} - 10^3 \text{ g cm}^{-3}$ (в зависимости от возраста звезды, химического состава поверхности и магнитного поля). Сове-

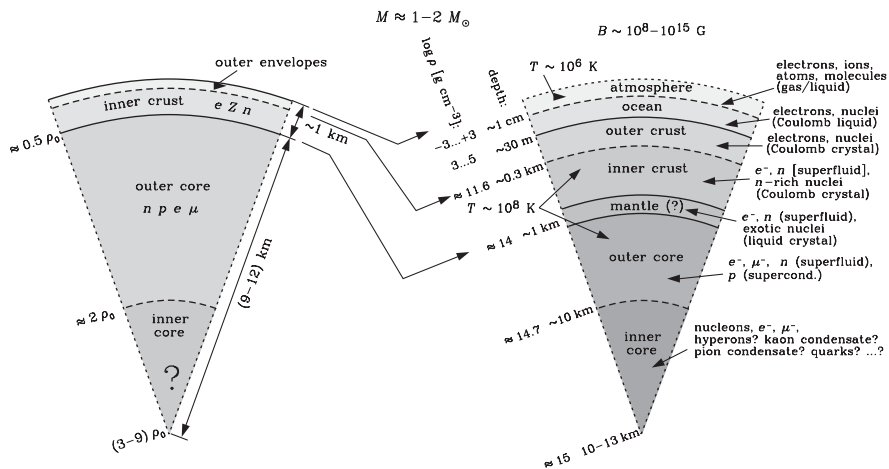


Рис. 1. Схематическая структура нейтронной звезды (слева крупномасштабная, справа более детальная, но без выдерживания масштаба).

менные наблюдения теплового излучения нейтронных звезд, сделанные при помощи рентгеновских и оптических телескопов нового поколения, для своей интерпретации требуют понимания формирования этого излучения и надежного теоретического моделирования его спектра и поляризации. Решению этой задачи посвящена работа, которая проводится в секторе теоретической астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе в сотрудничестве с группами теоретической астрофизики во Франции (G. Chabrier и др.) и США (D. Lai и др.). Ниже мы кратко изложим результаты этой работы.

Шибанов и др. [1, 2] построили первые модели атмосфер нейтронных звезд с сильным магнитным полем и показали, что не только химический состав атмосферы, но и ее магнитное поле сильно влияет на свойства выходящего излучения (спектр, поляризацию, диаграмму направленности). Они предполагали, что атмосфера представляет собой полностью ионизованную плазму. В то время использование такого предположения было неизбежно ввиду недостатка данных об атомах в сильных магнитных полях (энергиях связи, волновых функциях, вероятностях радиационных переходов), а также ввиду отсутствия расчетов термодинамических функций и степеней ионизации плазмы с сильным магнитным полем. Такие расчеты особенно осложняются необходимостью учета теплового движения атомов в атмосфере. Магнитное поле $B \gg B_0$, где $B_0 = m_e^2 c^3 / \hbar^3 = 2,35 \times 10^9$ G, уже само по себе радикально влияет на атом (так, размер электронного облака поперек поля уменьшается

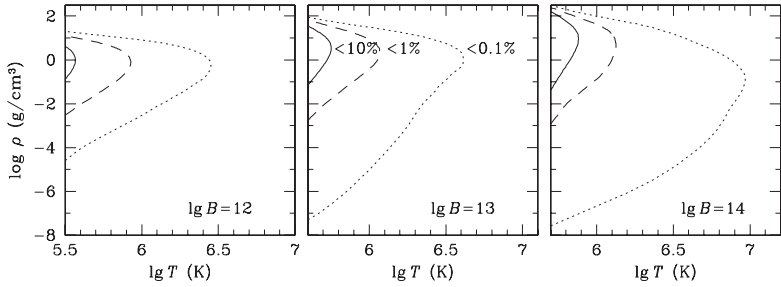


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая степень ионизации водородной плазмы в зависимости от температуры T , плотности ρ и магнитного поля B . Контуры на плоскости $T - \rho$ соответствуют 0,1%, 1% и 10% атомов H по отношению к общему числу протонов в плазме.

как $(B_0/B)^2$, а энергия основного состояния растёт как $\ln^2(B/B_0)$, а движение атома поперек такого поля приводит к не менее важным эффектам: электрическое поле, наведенное в сопутствующей системе отсчёта, нарушает цилиндрическую симметрию и связывает внутренние степени свободы атома с движением центра масс.

Наиболее вероятные химические элементы, из которых может формироваться атмосфера нейтронной звезды, — железо (потому что из него состоят внешние слои нейтронной звезды в первые минуты после ее рождения при взрыве сверхновой) или водород (потому что в основном из водорода состоит межзвездное вещество, которое выпадает на поверхность звезды вследствие гравитационного притяжения). За последние 10 лет были проведены расчеты и составлены базы данных квантовомеханических характеристик атома водорода, движущегося в сильном магнитном поле [3, 4], в том числе вероятностей радиационных переходов в дискретном спектре [5] и сечений фотоионизации [6], а также термодинамических функций и степеней ионизации водородной плазмы [7, 8, 9], ее тензора поляризуемости и векторов поляризации нормальных электромагнитных волн [10] и коэффициентов поглощения [8, 9, 10] при $B \sim 10^{12} - 10^{15}$ G. Рисунок 2 демонстрирует увеличение доли нейтральных атомов в атмосфере нейтронной звезды с ростом напряженности магнитного поля. Несмотря на то, что в типичных случаях эта доля едва достигает нескольких процентов, из-за своего резонансного характера связанны-связанные и связанны-свободные радиационные переходы в атомах дают весомый вклад в поглощение фотонов. При этом чрезвычайно важно принимать во внимание, что квантовомеханическая структура атомов существенно зависит от движения их центра масс в сильном магнитном поле.

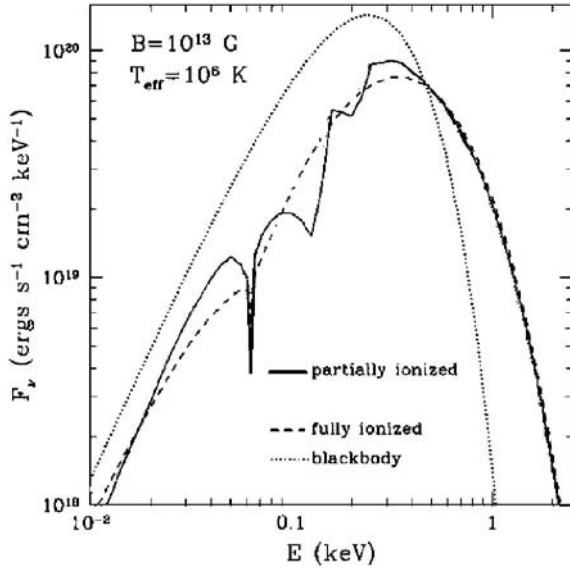


Рис. 3. Спектр нейтронной звезды ($M = 1,4 M_{\odot}$, $R = 10 \text{ km}$, $B = 10^{13} \text{ G}$, $T = 10^6 \text{ K}$, поле нормально к поверхности, поток усреднен по углам; F_{ν} — спектральный поток, E — энергия фотона). Точки — планковский спектр, короткие штрихи — модель полностью ионизованной водородной атмосферы, сплошная линия — модель частично ионизованной атмосферы.

Полученные результаты позволили перейти к построению моделей *частично ионизованных* водородных атмосфер нейтронных звезд и расчету спектров их теплового излучения.

Данная задача решалась в работах [10, 11]. Оказалось, что частичная ионизация замагниченной плазмы в атмосферах нейтронных звезд приводит к появлению спектральных особенностей и изменениям уровня спектрального континуума, которые должны проявляться в наблюдениях. В качестве примера на рис.3 показан спектр типичной нейтронной звезды, рассчитанный с использованием нескольких моделей ее атмосферы. Результаты моделирования уже нашли практическое применение: на их основе впервые объяснен спектр близкой изолированной нейтронной звезды RX J1856.5-3754 [12].

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 03-07-90200).

Литература

- [1] Yu. A. Shibano, G. G. Pavlov, V. E. Zavlin, J. Ventura, *Astron. Astrophys.* **266**, 313 (1992).
- [2] Ю. А. Шибанов, В. Е. Завлин, *Письма в Астрон. журн.* **21**, 5 (1995).
- [3] A. Y. Potekhin, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **27**, 1073 (1994).
- [4] A. Y. Potekhin, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **31**, 49 (1998).
- [5] G. G. Pavlov, A. Y. Potekhin, *Astrophys. J.* **450**, 883 (1995).
- [6] A. Y. Potekhin, G. G. Pavlov, *Astrophys. J.* **483**, 414 (1997).
- [7] A. Y. Potekhin, G. Chabrier, Yu. A. Shibano, *Phys. Rev. E* **60**, 2193 (1999).
- [8] A. Y. Potekhin, G. Chabrier, *Astrophys. J.* **585**, 955 (2003).
- [9] A. Y. Potekhin, G. Chabrier, *Astrophys. J.* **600**, 317 (2004).
- [10] A. Y. Potekhin, D. Lai, G. Chabrier, W. C. G. Ho, *Astrophys. J.* **612**, 1034 (2004).
- [11] W. C. G. Ho, D. Lai, A. Y. Potekhin, G. Chabrier, *Astrophys. J.* **599**, 1293 (2003).
- [12] W. C. G. Ho, D. L. Kaplan, P. Chang, M. van Adelsberg, *Astrophys. J.* (submitted).