

Астрофизика

Физика нейтронных звезд

А.Ю. ПОТЕХИН

доктор физико-математических наук

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

В 2018 году исполняется 85 лет теоретическому предсказанию нейтронных звезд. Это самые плотные звезды, открытые до сих пор, что делает их уникальными по многим параметрам. Плотность и давление вещества в их недрах, ускорение силы тяжести на поверхности, напряженность магнитного поля несравнимы с теми, которые когда-либо созданы человеком в лаборатории или природой в иных наблюдаемых объектах. Поэтому нейтронные звезды стали бесценными природными лабораториями для проверки передовых физических теорий – от теории относительности и теории элементарных частиц до квантовой электродинамики и физики сильно-неидеальной плазмы.

Нейтронные звезды – разновидность компактных звезд

Нейтронные звезды находятся в одном ряду с обычными звездами по своей массе $M \sim 1\text{--}2 M_{\odot}$, где $M_{\odot}$ – масса Солнца, но при этом они имеют в сотни тысяч раз меньшие радиусы $R \sim 10\text{--}13$ км. Такие размеры определяются, главным образом, балансом сил гравитации и давления вырожденных нейтронов. Ускорение свободного падения у поверхности такой звезды превышает 10^{14} см с⁻², а ее средняя плотность в два-три раза превосходит среднюю плотность тяжелого атомного ядра – нормальную ядерную плотность $\rho_0 = 2,8 \times 10^{14}$ г см⁻³. Столь плотное вещество нельзя получить в лаборатории, и его свойства неясны. Не вполне известен даже его состав – ведь нейтронные звезды, несмотря на название, состоят не только из нейтронов. Для описания вещества этих звезд построены разнообразные теоретические модели, и выбор в пользу одной из них возможен только на основе наблюдений. Поэтому наблюдения нейтронных звезд можно использовать для проверки теоретических моделей экстремально сжатого вещества. И наоборот, прогресс в изучении экстремальных состояний вещества создает предпосылки для построения корректных моделей нейтронных звезд и адекватной интерпретации их наблюдений.

Нейтронные звезды – не единственные, в недрах которых вещество сжато до плотностей, недостижимых в лаборатории. Другие представители класса компактных звезд – это белые карлики и гипотетические кварковые звезды. В белых карликах гравитационному сжатию противостоит давление вырожденных электронов, а в кварковых звездах – давление материи, состоящей из кварков, не сгруппированных в адроны. Белые карлики, крошечные по сравнению с обычными звездами, при массе $M \sim M_{\odot}$ имеют радиус, сравнимый с радиусом Земли – и все же он во много сотен раз больше радиуса нейтронной звезды.

Кварковые звезды при такой же массе, напротив, могут быть еще меньше, чем нейтронные. Однако, в отличие от нейтронных звезд и белых карликов, кварковые звезды пока не наблюдались, и сама возможность их существования твердо не установлена.

Нейтронные звезды рождаются при взрывах сверхновых звезд II типа. Такой взрыв случается, когда звезда-предшественник сверхновой израсходует все свое ядерное «горючее» — сначала водород, затем образовавшийся из него гелий, а потом и более тяжелые химические элементы вплоть до кислорода и магния. Конечным продуктом последующих ядерных превращений становятся изотопы элементов группы железа, которые накапливаются в центре звезды. Только давление вырожденного электронного газа удерживает такое железо-никелевое ядро звезды от коллапса — схлопывания к центру под действием силы тяжести. Но уже через несколько дней после выгорания кислорода железное ядро достигает массы, превышающей предел Чандрасекара — максимальную массу, гравитационному сжатию которой еще способно противостоять давление вырожденных электронов. Тогда наступает коллапс. Выделение гигантской гравитационной энергии ($\sim 10^{53}$ эрг) приводит к возникновению ударной волны, которая сбрасывает внешние оболочки звезды-гиганта со скоростью, достигающей до 10 % от скорости света, тогда как внутренняя часть звезды продолжает сжиматься. При этом атомные ядра сливаются в одно гигантское ядро. Если его масса не превышает некоторый максимум (предел Оппенгеймера — Волкова), при котором гравитационное сжатие еще может быть остановлено давлением нейтронов и других адронов, то образуется нейтронная звезда, а иначе — черная дыра. При рождении нейтронной звезды большую часть выделившейся гравитационной энергии уносят нейтрино, около 1 % переходит в кинетическую энергию разлетающихся оболочек, впоследствии формирующих туманность — остаток сверхновой, и лишь около 0,01 % — в электромагнитное излучение. И все же это излучение, наблюдаемое как сверхновая, может затмить свечение целой галактики.

Не всякая звезда может завершить свою эволюцию как сверхновая: такая участь суждена лишь достаточно массивным звездам, с массами $M \gtrsim 8M_{\odot}$. Менее массивная звезда в конце своего жизненного пути, пройдя через стадию гиганта, постепенно сбрасывает внешние оболочки, а оставшаяся центральная часть, сжимаясь, превращается в белый карлик.

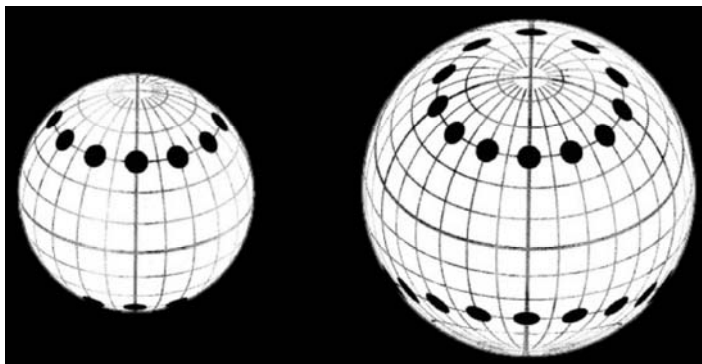


Рисунок 1. Искривление траектории фотонов увеличивает наблюдаемый радиус нейтронной звезды (правый рисунок), делая видимой некоторую часть поверхности, которая в отсутствие эффектов ОТО была бы скрыта за горизонтом звезды (левый рисунок). (Рисунок NASA/GSFC)

Для нейтронных звезд, в отличие от обычных, большую роль играют эффекты общей теории относительности (ОТО). Например, частота фотона, испущенного нейтронной звездой, при удалении от нее уменьшается на десятки процентов вследствие искривления пространства-времени у поверхности (этот эффект называется гравитационным красным смещением). При этом траектория фотона искривляется, что позволяет земному наблюда-

телю «заглянуть за горизонт» нейтронной звезды. Отсюда вытекают два взаимосвязанных следствия: во-первых, количественная теория нейтронных звезд должна быть релятивистской, а во-вторых, наблюдения нейтронных звезд открывают уникальные возможности для измерения эффектов ОТО и проверки ее предсказаний. Благодаря этому, разнообразные предсказания ОТО проверены с высокой степенью точности, а на альтернативные модели гравитации наложены жесткие ограничения.

Еще одна замечательная особенность многих нейтронных звезд – наличие у них магнитного поля, недостижимого в земных условиях. Распределение магнитных полей радиопульсаров – космических источников периодических радиоимпульсов – охватывает диапазон от 10^4 Тл до 10^{10} Тл с максимумом вблизи 10^8 Тл (для сравнения, самое сильное магнитное поле, достигнутое в лаборатории без разрушения установки, составляет 100 Тл). Магнитные поля магнитаров – нейтронных звезд с особенно сильными магнитными полями – достигают у поверхности $10^{10} - 10^{11}$ Тл, а в глубине звезды, возможно, доходят до 10^{12} Тл.

Немного истории

Нейтронные звезды были теоретически предсказаны как вероятный результат взрывов сверхновых звезд в 1933 году Вальтером Бааде и Фрицем Цвикки. Они же предложили и сам термин «сверхновая», чтобы отличать эти необычайно яркие объекты от более многочисленных новых звезд. Как теперь известно, новые звезды возникают из-за термоядерного горения вещества, осевшего на поверхность белых карликов. Сверхновые же, как догадались Бааде и Цвикки, вспыхивают при гравитационном коллапсе. Сжатое таким образом вещество образует нейтронную звезду.

Больше 30 лет после своего предсказания нейтронные звезды оставались гипотетическими объектами, так как астрономия того времени не располагала инструментами, которые позволили бы их обнаружить. Но они привлекали внимание теоретиков. В 1938 году Ф. Цвикки оценил максимальную энергию связи нейтронной звезды и гравитационное красное смещение фотонов, испущенных с ее поверхности. Меньше чем через год Ричард Толмен и Роберт Оппенгеймер с Георгием Волковым вывели уравнение гидростатического равновесия сферически симметричного тела в ОТО. На этой основе Оппенгеймер и Волков оценили предельную массу $M_{\max}$ нейтронной звезды. Правда, их оценка оказалась в несколько раз заниженной из-за пренебрежения взаимодействием между нейтронами. Только в 1959 году, используя значительно развитую к тому времени теорию ядра, Аластер Кэмерон получил первую реалистичную оценку $M_{\max}$ (около двух масс Солнца). Он же первым указал на то, что в ядре нейтронной звезды могут присутствовать гипероны. В том же году А.Б. Мигдал отметил возможную сверхтекучесть нуклонов в нейтронной звезде. В середине 1960-х годов были проведены первые расчеты нейтринного излучения из недр нейтронной звезды и ее остывания (немалый вклад в эти исследования внес все тот же Аластер Кэмерон). В те же годы В.Л. Гинзбург предсказал наличие у нейтронных звезд магнитного поля порядка 10^8 Тл, а Н.С. Кардашев – образование туманностей вокруг таких замагниченных быстровращающихся звезд (они известны как пульсарные туманности, или плерионы).

Уже первые оценки показали, что поверхность типичной нейтронной звезды может иметь температуру в сотни тысяч и миллионы градусов, а значит, должна испускать тепловое излучение, в основном, в виде мягких рентгеновских лучей. Такие лучи поглощают-

ся земной атмосферой, поэтому наблюдать их можно только из космоса. Надежды обнаружить такое излучение появились с зарождением рентгеновской астрономии в начале 1960-х годов, однако фактически тепловые рентгеновские компоненты в спектрах нейтронных звезд стали уверенно регистрировать лишь в 1990-х, после запуска спутника “ROSAT” с рентгеновским телескопом, способным давать изображения с разрешением в несколько угловых секунд. В XXI веке измерения рентгеновских спектров вышли на качественно новый уровень благодаря работе орбитальных обсерваторий “ХММ-Ньютон” и “Чандра” (о развитии рентгеновской астрономии см. Земля и Вселенная, 2014, № 4, с. 3-18; № 5, с. 3-21; 2017, № 4, с. 3-23).

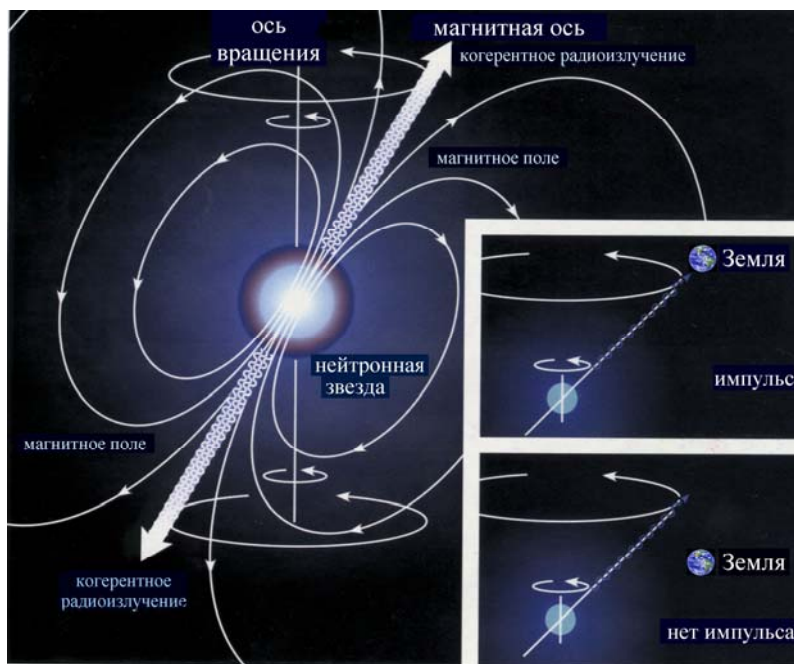


Рисунок 2. Принцип работы радиопульсара.
(Рисунок Х. Чен [H.Cheng], доработанный автором.)

Однако впервые нейтронные звезды обнаружили себя как радиопульсары. Первый из них был открыт в 1967 году группой радиоастрономов в Кембридже (Великобритания). Молодая сотрудница этой группы Джоселин Белл обнаружила в записях сигнала от радиотелескопа таинственные импульсы, повторяющиеся с исключительно стабильным периодом, равным 1,33 с. Вскоре она открыла еще несколько похожих радиоисточников. Потом за это руководителю группы Энтони Хьюишу присудили Нобелевскую премию. Вслед за публикацией этих наблюдений появился целый ряд гипотез, претендовавших на их объяснение. Правильное объяснение дал Томас Голд в статье «Вращающиеся нейтронные звезды как причина пульсирующих радиоисточников». Дело в том, что вращающаяся нейтронная звезда с сильным магнитным полем окружена протяженной плазменной магнитосферой. Магнитосфера наполнена заряженными частицами. Некоторые из них вырваны с поверхности электрическим полем, наведенным при вращении звезды, другие испущены в результате термоэмиссии, третьи родились при столкновениях заряженных частиц друг с другом и с фотонами. Если звезда вращается достаточно быстро, то в некоторых областях магнитосферы происходит мощное ускорение частиц. Их ускоряет электрическое поле, наведенное вращением, там, где плотность плазмы недостаточна для его экранирования. При этом генерируется когерентное направленное радиоизлучение, благодаря которому нейтронная звезда может наблюдаться как пульсар, если при ее вращении конус излучения пересекает луч зрения наблюдателя.

Еще до обнаружения пульсаров И.С. Шкловский сопоставил рентгеновские и оптические наблюдения ярчайшего рентгеновского источника Скорпион X-1 и заключил, что его излучение порождается аккрецией – оседанием на нейтронную звезду вещества со звезды-компаньона. Догадку И.С. Шкловского по праву можно считать открытием аккрецирующих нейтронных звезд. К сожалению, тогда его вывод был воспринят скептически, хотя впоследствии он подтвердился.

После открытия пульсаров теория и наблюдения нейтронных звезд стали развиваться бурными темпами. Ежегодно появляется более тысячи посвященных им публикаций, а раз в несколько лет происходит открытие нового класса астрономических объектов, содержащих нейтронные звезды. Так, в 1971 году были открыты рентгеновские пульсары, в 1975 году – барстеры, то есть источники рентгеновских всплесков, в 1979 году – источники мягких повторяющихся гамма-всплесков, в 1982 году – миллисекундные пульсары, в 1996 году – «радиотихие» изолированные нейтронные звезды, в 1998 году – аномальные рентгеновские пульсары (о них будет речь ниже), в 2006 году – быстрые радиотранзиенты (яркие радиопульсары, которые то обнаруживают себя, то исчезают), в 2008-м – гамма-пульсары.

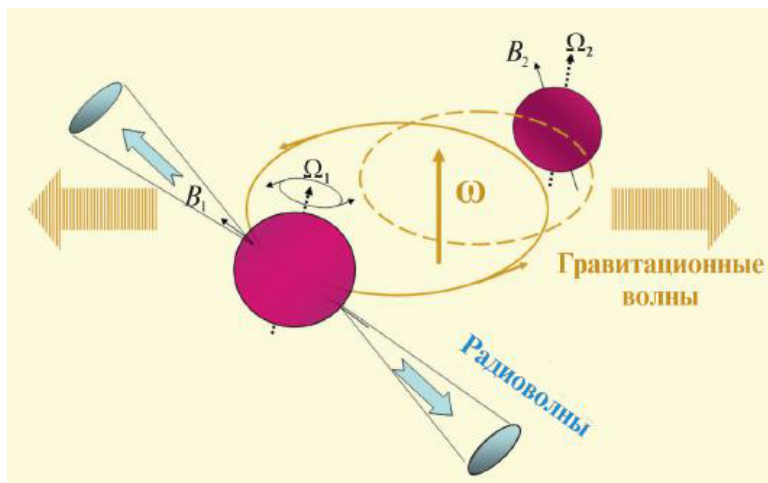
Многообразие нейтронных звезд

Нейтронные звезды излучают во всех диапазонах электромагнитного спектра. Большинство из них, как и полвека назад, наблюдаются как радиопульсары (их известно свыше 2600). Пульсирующее излучение, связанное с вращением нейтронной звезды, содержит важную дополнительную информацию. Так, одновременное измерение радиоизлучения на нескольких частотах позволяет по сдвигу фаз определить меру дисперсии, по которой приблизительно оценивается расстояние до пульсара. Измерение периода пульсаций и его производной по времени позволяет по порядку величины оценить возраст пульсара t и величину его магнитного поля B (точнее, его дипольной составляющей). Обычно период составляет несколько секунд или десятых долей секунды, возраст оценивается от тысяч до десятков миллионов лет, а магнитное поле $B \sim 10^7 - 10^9$ Тл. Но несколько процентов пульсаров имеют миллисекундные периоды, которые меняются чрезвычайно медленно. Этим пульсарам сотни миллионов и миллиарды лет, а их магнитные поля $B \sim 10^4 - 10^6$ Тл. Когда-то они входили в состав двойных систем с аккрецией. Перетекавшее на них вещество приносило с собой угловой момент, ускоряя вращение, и способствовало затуханию магнитного поля. Поэтому миллисекундные пульсары называют «подкрученными».

Многие нейтронные звезды наблюдаются в двойных системах с другими нейтронными звездами, с белыми карликами и с обычными звездами. Неизвестны двойные системы, в которых компаньоном нейтронной звезды была бы черная дыра. Измерение параметров орбиты двойной системы позволяет получить дополнительную информацию о нейтронной звезде – в частности, оценить ее массу. Когда вторая звезда в двойной системе тоже компактная (нейтронная звезда или белый карлик), то, кроме обычных кеплеровских параметров орбиты, нередко удается измерить параметры двойной системы, связанные с эффектами ОТО – изменение углового момента из-за излучения гравитационных волн, смещение периастра, геодезической прецессией, задержку фотонов при их прохождении вблизи звезды-компаньона (эффект Шапиро). В таких случаях массы обеих звезд измеряются с высокой точностью, а ОТО неизменно получает дополнительное подтверждение.

Рисунок 3. Пульсар, обращающийся с другой нейтронной звездой вокруг общего центра масс. Такая система интенсивно излучает гравитационные волны и проявляет другие эффекты, предсказанные в ОТО. Указаны направление диполей магнитных полей (B_1 и B_2) и осей вращения (Ω_1 и Ω_2) компонентов двойной системы, а также их общая ось вращения ω .

(Рисунок автора)



Около 8 % известных нейтронных звезд входят в состав двойных систем с аккрецией и проявляют себя рентгеновским излучением аккреционного диска, а также вспышками, возникающими из-за взрывного термоядерного горения аккрецированного вещества во внешних слоях звезды. Два вида таких систем – это маломассивные рентгеновские двойные системы, в которых компаньон – звезда-карлик (белый или красный) с массой $M \lesssim 2M_{\odot}$, и массивные двойные, в которых масса звезды-компаньона в несколько раз, а то и в десятки раз превышает солнечную, а аккреция вещества на нейтронную звезду протекает весьма бурно.

Рентгеновские двойные могут быть источниками регулярного (периодического) и нерегулярного излучения. В их числе есть рентгеновские пульсары, у которых излучение модулировано вращением нейтронной звезды, барстеры – нейтронные звезды, на поверхности которых время от времени происходит термоядерный взрыв, источники квазипериодических осцилляций и другие разновидности. Некоторые маломассивные двойные системы образуют рентгеновские транзиенты, у которых периоды активной аккреции (обычно в течение дней или недель) перемежаются с более длительными (несколько месяцев, а иногда и лет) «периодами спокойствия», во время которых видно только изучение нагретой поверхности звезды.

Зарегистрировано также и рентгеновское излучение более ста изолированных нейтронных звезд. Часто такое излучение возникает в результате ускорения частиц в магнитосфере звезды. У некоторых нейтронных звезд (их известно более сорока) наблюдается тепловое рентгеновское излучение, исходящее с нагретой поверхности или из фотосферы. Иногда в спектре пульсара удастся выделить две тепловые составляющие, более жесткая из которых предположительно соответствует излучению «полярных шапок», нагретых до нескольких миллионов градусов. Это те области, в которых магнитное поле почти перпендикулярно к поверхности нейтронной звезды. Именно над ними генерируется сверхсильное электрическое поле, которое ускоряет заряженные частицы. Часть ускоренных частиц бомбардирует поверхность, нагревая ее. Мягкая рентгеновская тепловая составляющая спектра соответствует излучению остальной, менее горячей поверхности, которое может порождаться теплом, приходящим из звездных недр. Распределение этого тепла по поверхности также неоднородно, потому что теплопроводность звездной коры зависит от величины магнитного поля и его направления, которое меняется от точки к точке.

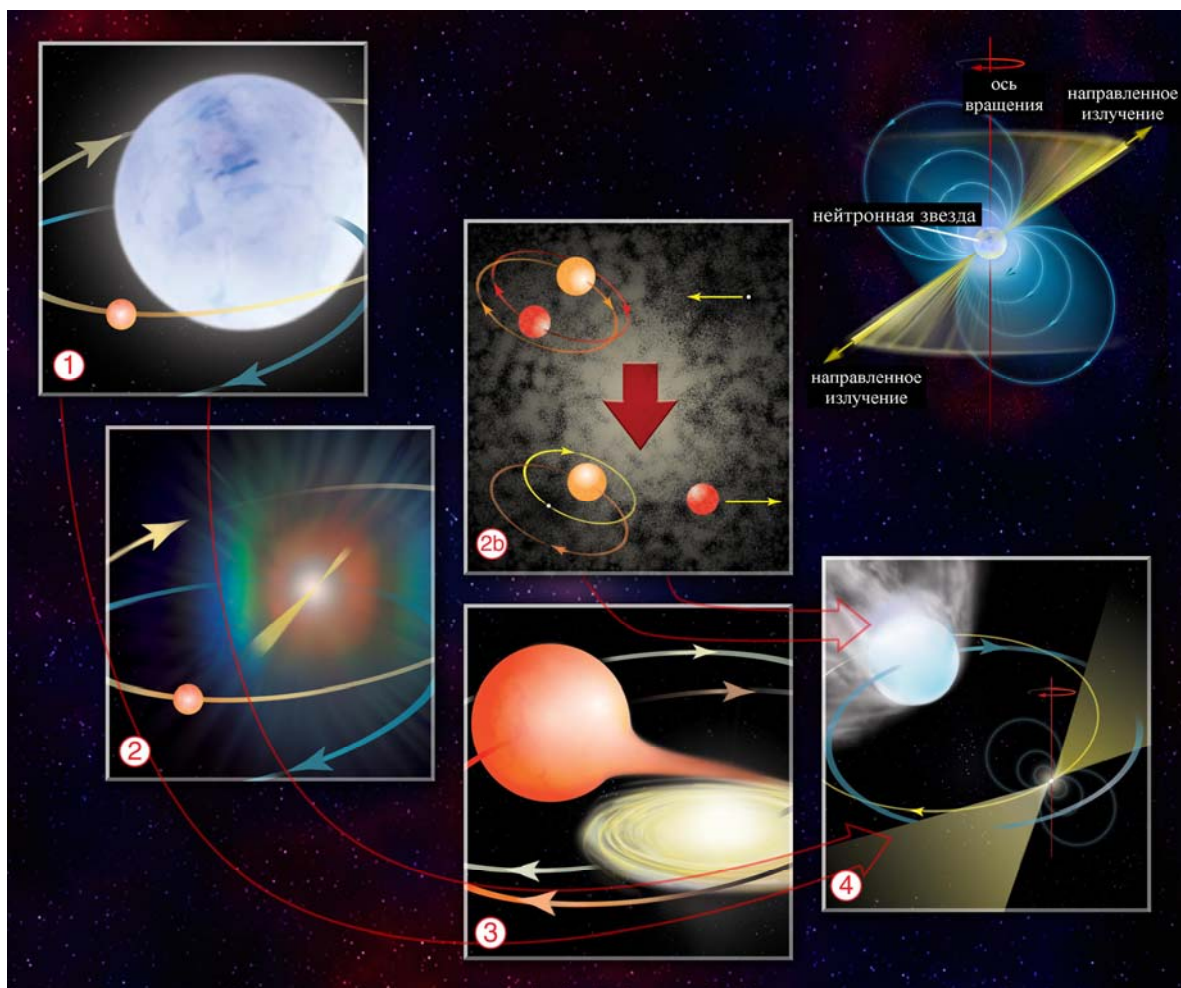


Рисунок 4. Схема возникновения рентгеновской двойной системы и миллисекундного пульсара. 1. Звезда-сверхгигант и звезда главной последовательности обращаются вокруг общего центра масс. 2. Массивная звезда, израсходовав свое ядерное горючее, взрывается как сверхновая. На ее месте остается нейтронная звезда. 3. Если двойная система пережила взрыв сверхновой, то звезда меньшей массы продолжает свою эволюцию и через миллиарды лет становится красным гигантом. Его вещество перетекает на нейтронную звезду, образуя горячий диск вокруг нее и постепенно оседая на ее поверхность. Этот процесс, называемый аккрецией, раскручивает нейтронную звезду. 4. К моменту окончания аккреции нейтронная звезда становится миллисекундным пульсаром. Но если вокруг много других звезд (как в шаровом скоплении), то может реализоваться вариант 2b. В этом случае двойная система может разрушиться или подвергнуться процессу обмена, при котором один из ее компонентов меняется местами с одиночной звездой. (Рисунок NRAO/NSF)

В отличие от нормальных и миллисекундных рентгеновских пульсаров, многие из которых входят в состав двойных систем, аномальные рентгеновские пульсары (сокращенно АХР, от английского “anomalous X-ray pulsar”) являются изолированными и обладают необычно долгими периодами $\sim 6\text{--}12$ с, но при этом имеют высокую рентгеновскую светимость. Их периоды сравнительно быстро увеличиваются, указывая на то, что эти объекты обладают полями $B \gtrsim 10^{10}$ Тл. Выдвигалось и альтернативное объяснение свойств

АХР, основанное на предположении, что это нейтронные звезды с «нормальными» магнитными полями $\sim 10^8$ Тл, на которые медленно оседает вещество, оставшееся после взрыва сверхновой. Таким образом, природа этих объектов еще не до конца ясна.

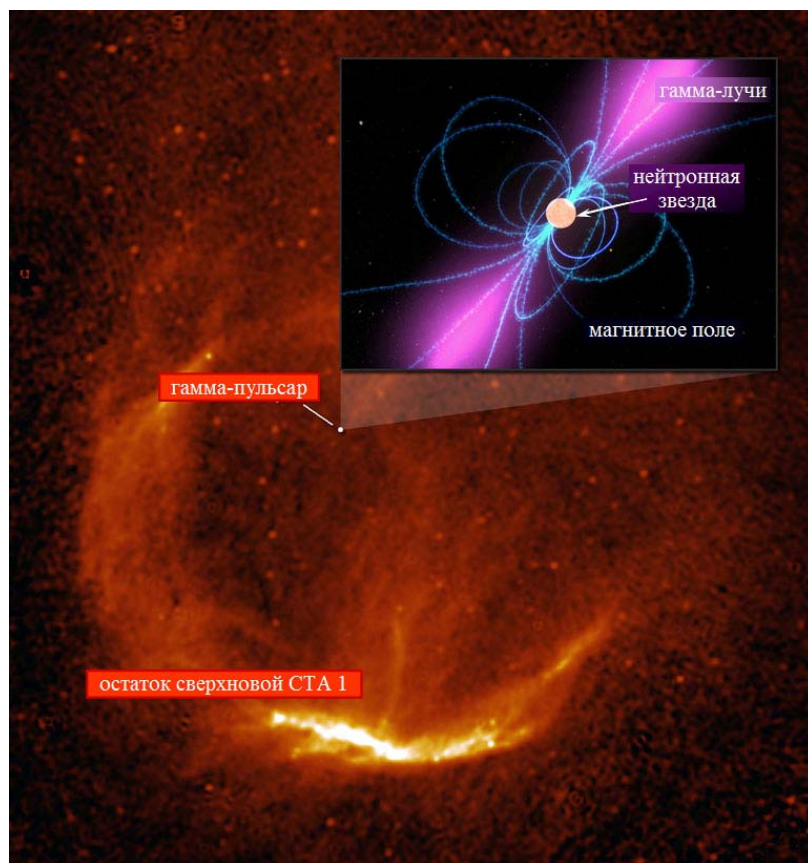


Рисунок 5. Расширяющийся остаток сверхновой СТА 1, вблизи центра которого находится гамма-пульсар – вращающаяся нейтронная звезда, излучающая направленные пучки гамма-лучей. (Рисунок NASA/S. Pineault, DRAO)

По своим свойствам к АХР очень близки источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR, от английского “soft gamma repeater”). Первоначально эти два класса были разделены, потому что их наблюдательные проявления были различны. Однако со временем выяснилось, что некоторые АХР так же, как SGR, время от времени производят яркие вспышки в гамма-диапазоне. С другой стороны, SGR в периоды между вспышками ведут себя так же, как АХР. Поэтому в современной астрофизике их объединяют в единый класс нейтронных звезд SGR/АХР. Гипотеза о том, что они являются магнитарами, помогает объяснить не только аномальное замедление их вращения, но и энергетику их мощной вспышечной активности. Она может обеспечиваться магнитной энергией, запасенной в теле магнитара. Физические механизмы высвобождения этой энергии продолжают обсуждаться. На этот счет есть несколько гипотез, которые могут дополнять друг друга, но ни одна из них не является твердо установленной.

Важным событием в астрофизике стало открытие на пороге XXI века радиотихих нейтронных звезд с тепловыми рентгеновскими спектрами. К ним относятся центральные компактные объекты (ЦКО) в остатках сверхновых и рентгеновские изолированные нейтронные звезды (сокращенно XINS – “X-ray isolated neutron stars”).

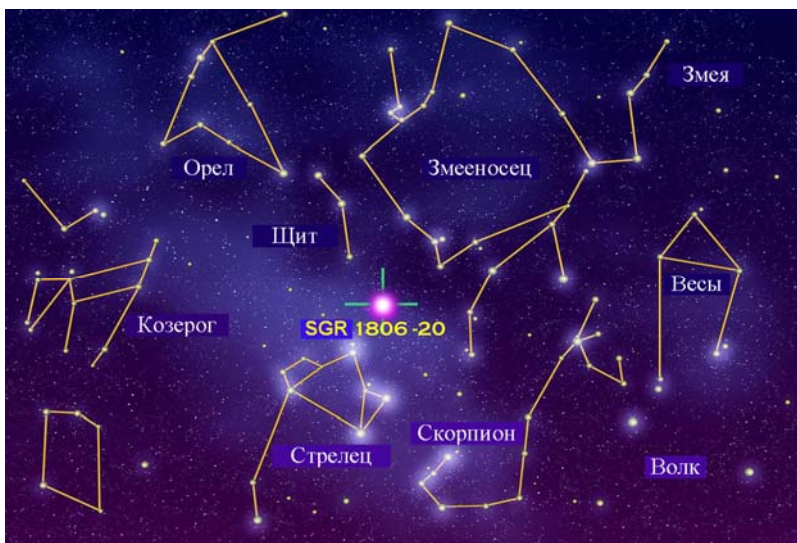


Рисунок 6. Положение на небе источника мягких повторяющихся гамма-всплесков SGR 1806–20, который 37 декабря 2004 года стал источником вспышки рекордной мощности (Рисунок: NASA/GFSC)

Известно около десятка ЦКО. В излучении трех из них обнаружены пульсации, периоды которых довольно малы (от 0,1 с до 0,42 с) и при этом весьма стабильны. Это указывает на то, что ЦКО имеют не слишком сильное крупномасштабное магнитное поле ($\sim 10^7$ Тл у поверхности). С другой стороны, большая амплитуда пульсаций указывает на сильно неоднородное распределение температуры по поверхности, для объяснения которого привлекалась гипотеза о сверхсильном тороидальном магнитном поле, скрытом в коре звезды.

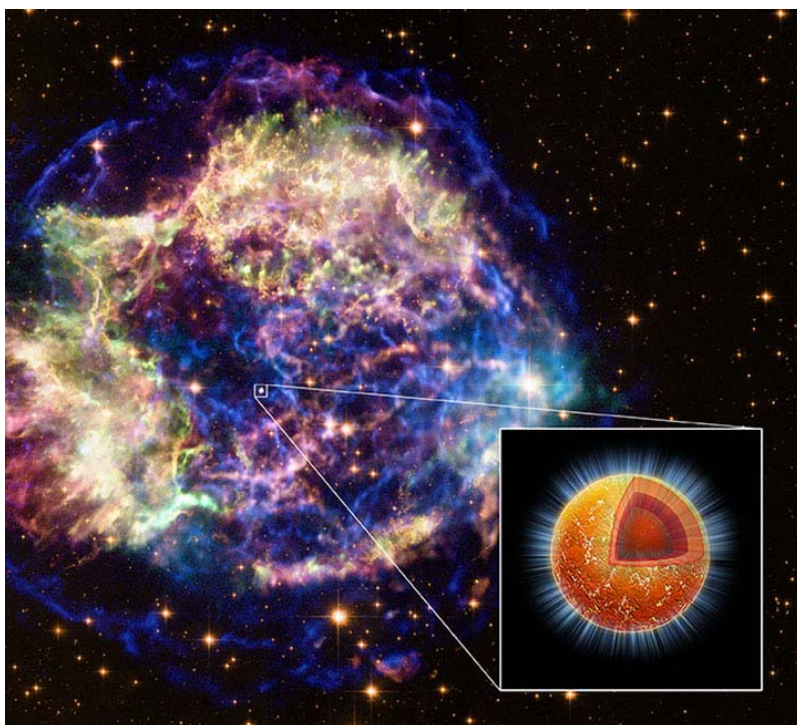


Рисунок 7. Остаток сверхновой Кассиопея А, в центре которого находится радиотихая остывающая нейтронная звезда – ЦКО с углеродной атмосферой. (Рисунок NASA/CXC /UNAM/Ioffe/D.Page, P.Shternin et al.; NASA/STScI; NASA/CXC/M.Weiss)

Рентгеновский источник, открытый в 2008 году и названный Кальверой, сначала рассматривался как возможный восьмой объект со свойствами «Великолепной семерки». Но потом оказалось, что он близок по своим свойствам к ЦКО. В 2013 году удалось измерить производную периода Кальверы. Ее значение соответствует полю $\sim 4 \times 10^7$ Тл. Авторы этих наблюдений Халперн и Готтелф предположили, что Кальвера – это ЦКО, магнитное поле которого пробивается к поверхности через обломки сверхновой.

Загадки ядра нейтронной звезды

В нейтронной звезде выделяются две основные качественно отличные области – ядро и оболочка. Ядро, в свою очередь, подразделяется на внешнее и внутреннее, а оболочка – на твердую кору, жидкий океан и атмосферу.

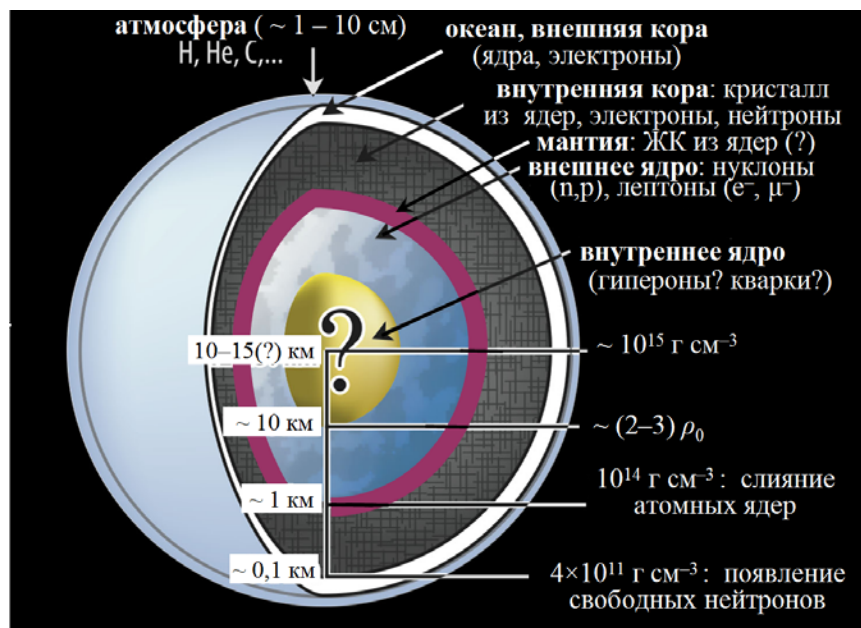


Рисунок 8. Строение нейтронной звезды. (Рисунок NASA/GFSC, доработанный автором.)

О веществе внешнего ядра, составляющем большую долю массы типичной нейтронной звезды, существуют четкие качественные представления: оно представляет собой нейтронную жидкость с примесью протонов, электронов и μ -мезонов (мюонов), причем все составляющие сильно вырождены. Внутреннее ядро имеется только у достаточно массивных нейтронных звезд, с массами $M \gtrsim 1,5 M_\odot$. Оно занимает центральную область с плотностью $\rho \gtrsim 2\rho_0$, радиус которой в самых массивных нейтронных звездах может достигать до нескольких километров. Состав и свойства вещества во внутреннем ядре неизвестны, так как результат их расчета сильно зависит от используемого теоретического аппарата. Поэтому исследование нейтронных звезд важно не только для астрофизики, но и для физики ядра и элементарных частиц. Рассматриваются такие теоретические возможности, как появление различных гиперонов, образование бозонного конденсата из коллективных возбуждений, имеющих свойства π - или K -мезонов (пионов или каонов), и деконфайнмент – фазовый переход к кварковой материи.

В ядре нейтронной звезды адроны (во внешнем ядре – нуклоны) образуют сильно-взаимодействующую ферми-жидкость, а лептоны (электроны и мюоны) представляют собой почти идеальный ферми-газ. Все частицы в ядре нейтронной звезды сильно вырожде-

ны, поэтому на уравнение состояния и состав вещества влияет только плотность частиц, но не температура. Сложность отыскания свойств этого вещества состоит, однако, в том, что плотность энергии не удастся надежно рассчитать, когда концентрации разных типов частиц так высоки, как в ядре нейтронной звезды. Предпринимались многочисленные подходы к решению этой задачи с применением разнообразных методов теоретической физики. Результаты, полученные разными способами, заметно различаются, поэтому именно наблюдения нейтронных звезд должны помочь в отборе наиболее адекватных теоретических методов описания сверхплотной материи.

По мере остывания нейтронной звезды, барионы в значительной части ядра становятся сверхтекучими. Сверхтекучесть нейтронов и протонов при плотностях, близких к ядерной плотности ρ_0 или превышающих ее, предсказывают все современные теории, но оценки критических температур сверхтекучести сильно варьируются в диапазоне $10^8 - 10^{10}$ К и по-разному зависят от плотности. Сверхтекучие протоны образуют сверхпроводящую жидкость. Отметим, что это самая высокотемпературная сверхпроводимость, известная в природе. Сверхтекучесть уменьшает теплоемкость вещества и может по-разному влиять на теплопроводность и на скорость реакций, приводящих к излучению нейтрино и остыванию ядра звезды. Поэтому наблюдения нейтронных звезд способны дать информацию о свойствах барионной сверхтекучести.

Оболочки нейтронных звезд

Не только сверхплотное ядро нейтронной звезды, но и оболочки находятся большей частью в таких условиях, которые невозможно создать в лаборатории. По земным меркам, они характеризуются сверхвысокими значениями давления, плотности, температуры и магнитного поля. Оболочки различаются по своему составу, агрегатному состоянию и по своей роли в эволюции звезды и ее свойствах.

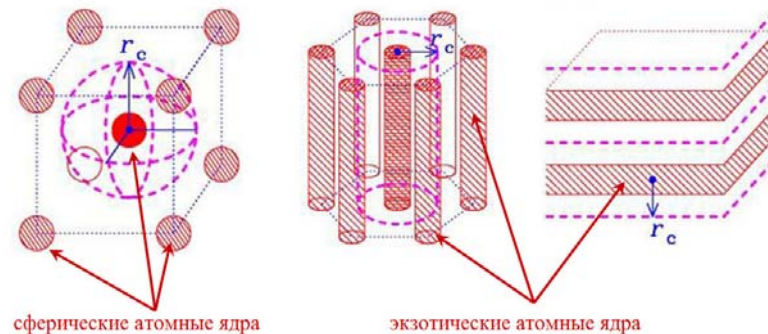


Рисунок 9. Расположение атомных ядер в коре нейтронной звезды (объемно-центрированная кубическая решетка, левый рисунок) и в ее мантии (цилиндрические и плоские ядра, образующие жидкокристаллические структуры, средний и правый рисунки). Вектор r_c – радиус объема, приходящегося на одно ядро. (Рисунок автора.)

Вещество самых глубоких оболочек, примыкающих к ядру нейтронной звезды, представляет собой жидкость из нейтронов и электронов, в которую погружены атомные ядра. Нейтроны и электроны в этих слоях сильно вырождены, а ядра являются нейтронно-избыточными – число нейтронов в них может в несколько раз превышать число протонов, и лишь гигантское давление удерживает их от распада. Электростатическое взаимодей-

ствие ядер настолько сильно, что упорядочивает их в кристаллическую решетку, которая формирует твердую звездную кору. Между корой и ядром звезды может находиться мантия (ее существование, правда, предсказывается не всеми современными моделями плотной материи). В мантии атомные ядра принимают экзотические формы протяженных цилиндров или пластин. Такое вещество ведет себя подобно жидким кристаллам.

Кора нейтронной звезды делится на внутреннюю и внешнюю. Внешняя кора отличается отсутствием свободных нейтронов. Граница пролегает при критической плотности, при которой начинается «просачивание нейтронов» из атомных ядер. С уменьшением плотности электростатическое взаимодействие между ядрами ослабевает, и в итоге кристаллическая решетка плавится, превращаясь в кулоновскую жидкость. Положение границы плавления, которую можно назвать дном океана нейтронной звезды, зависит от температуры и химического состава.

Особое значение имеет теплоизолирующая оболочка, определяющая плотность потока фотонов, испускаемых нейтронной звездой. Главным регулятором этого потока служит теплопроводность в так называемой полоске чувствительности, играющей роль своего рода «бутылочного горлышка», через которое тепло просачивается наружу. Положение полоски чувствительности зависит от массы и радиуса звезды, ее температуры, магнитного поля и химического состава оболочки. Поскольку теплоперенос поперек сильного магнитного поля затруднен, глубина залегания полоски чувствительности может быть разной в разных местах одной и той же звезды с сильным магнитным полем: там, где поле сильнее наклонено к поверхности, она расположена глубже. Как правило, она охватывает нижний слой океана и верхнюю часть коры и лежит в интервале плотности $\rho \sim 10^5 - 10^9 \text{ г см}^{-3}$.

Когда с уменьшением плотности электростатическая энергия ионов и электронная энергия Ферми становятся меньше кинетической энергии ионов, вырожденная кулоновская жидкость превращается в невырожденный газ. Внешняя оболочка звезды, в которой формируется электромагнитный спектр, представляет ее фотосферу. Из-за гигантского тяготения, фотосфера изолированной нейтронной звезды имеет толщину всего несколько сантиметров. Присутствие в фотосфере атомов, молекул и ионов, имеющих связанные состояния, существенно изменяет коэффициенты поглощения электромагнитного излучения, а значит, влияет на наблюдаемый спектр.

Химический состав оболочек может быть разным. Например, атмосфера может состоять из железа, так как это наиболее стабильный химический элемент, остающийся после взрыва сверхновой. Тем не менее, оболочки могут содержать водород и гелий, принесенные аккрецией. Из-за быстрого разделения ионов в сильном гравитационном поле, аккрецированная атмосфера может состоять целиком из водорода. Но если аккреция происходила только на ранней стадии жизни звезды, когда температура ее поверхности превышала несколько миллионов градусов, то водород мог продиффундировать в более плотные и горячие области и там сгореть в термоядерных реакциях, оставив на поверхности гелий. То же может произойти и с гелием, и тогда на поверхности останется углерод. Кроме того, в пульсарах действует механизм ядерного скалывания – дробления тяжелых химических элементов на более легкие при столкновениях с частицами, ускоренными в магнитосфере. Скалывание приводит к появлению изотопов лития, бериллия и бора. Поэтому только наблюдения могут ответить на вопрос, из какого вещества состоит атмосфера той или иной нейтронной звезды.

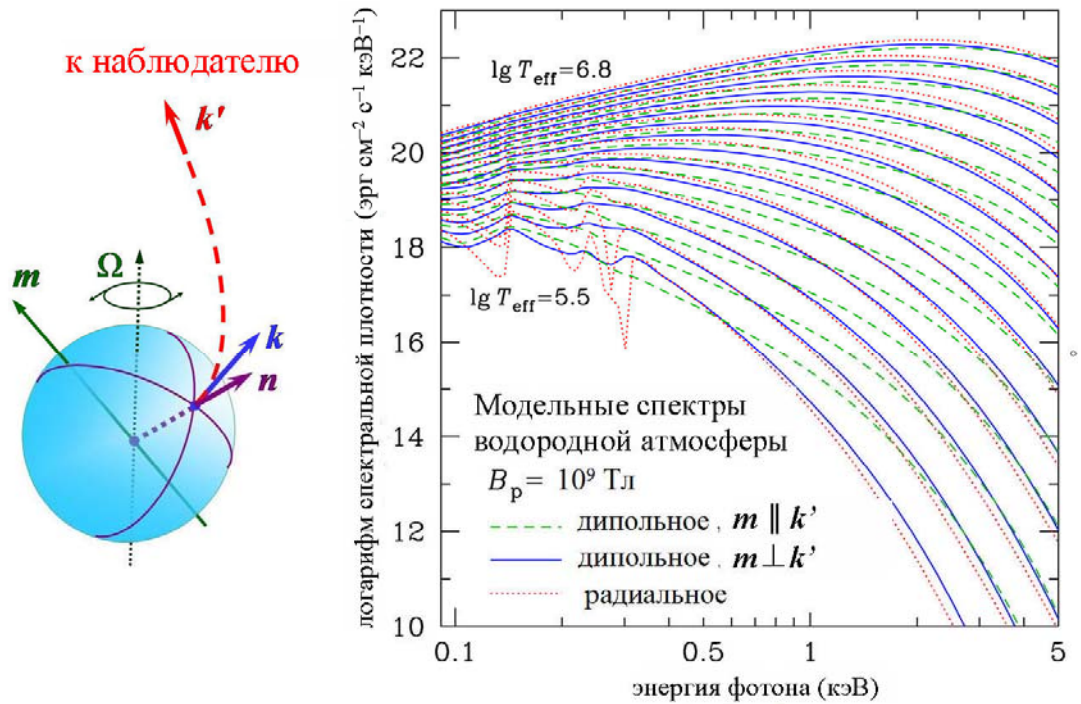


Рисунок 10. Магнитная ось m , ось вращения Ω и направление на наблюдателя в общем случае различаются, а вследствие искривления лучей и гравитационного красного смещения волновой вектор испущенного фотона k отличается от волнового вектора k' фотона, приходящего к наблюдателю (левый рисунок). При расчетах тепловых спектров это следует учитывать, интегрируя поток фотонов по видимой части звезды при заданном распределении магнитного поля и температуры. Поэтому в случае дипольного поля, в отличие от изотропного радиального, спектр зависит от ориентации m относительно луча зрения (правый рисунок) и меняется при вращении звезды. Спектральные особенности на правом рисунке обусловлены квантовыми переходами в атомах водорода, энергии которых сдвинуты в рентгеновскую область из-за сильного магнитного поля.

(Рисунок автора по данным W.C.G. Ho, A.Y. Potekhin, & G. Chabrier, 2008, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 178, 102.)

В атмосфере нейтронной звезды могут присутствовать атомы, молекулы, а также атомарные и молекулярные ионы, имеющие связанные состояния. Сильные магнитные поля радикально влияют на их свойства. При одной и той же температуре, связанные состояния должны быть намного многочисленнее в атмосфере звезды с сильным магнитным полем, чем со слабым, потому что в сильном магнитном поле энергии связи ряда состояний намного возрастают, а размеры атомов уменьшаются.

Превращение кулоновской жидкости в газ может быть скачкообразным. Такая возможность возникает при наличии фазового перехода первого рода между конденсированным веществом и невырожденной плазмой. При этом слой вещества в газовой фазе может быть оптически тонким. В последнем случае спектр нейтронной звезды может формироваться на твердой или жидкой поверхности, не прикрытой атмосферой. Возможна и «промежуточная» ситуация, когда над конденсированной поверхностью лежит атмосфера, которая может быть оптически толстой для одних длин волн и прозрачной для других.

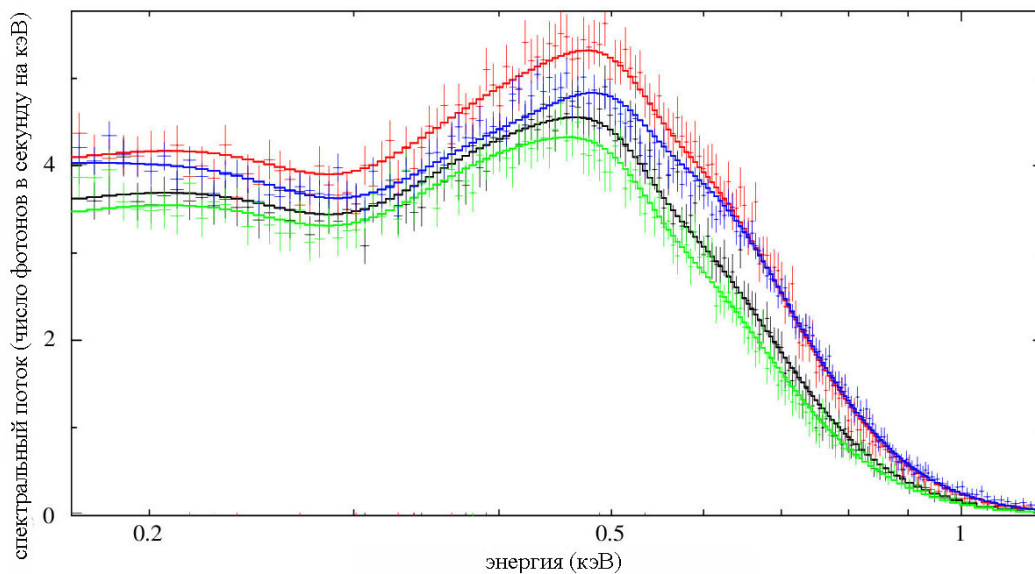


Рисунок 11. Сравнение наблюдаемого рентгеновского спектра одного из представителей «Великопеленной семерки», RBS1223 (отрезки погрешностей) в четырех интервалах фазы вращения (отмечены цветом) с результатом расчета при помощи модели частично ионизированной водородной атмосферы с сильным магнитным полем, лежащей на конденсированной железной поверхности (Рисунок *Hambaryan et al., 2011, Astron. Astrophys., 574, A74*).

Тепловая эволюция нейтронной звезды

Нейтронная звезда рождается с температурой выше 10^{10} К и затем остывает – сначала быстро, а потом все медленнее, освобождая энергию посредством нейтринного излучения из своих недр и электромагнитного излучения с поверхности. Кора звезды поначалу остается более горячей, чем ядро. Волна охлаждения достигает поверхности звезды примерно через 100 лет, после чего звезда остывает в квазистационарном режиме: распределение температуры в теплоизолирующей оболочке в каждый момент времени однозначно зависит от температуры в ядре. Квазистационарность может нарушаться такими процессами, как взрывное термоядерное горение аккрецированного вещества или выделение энергии в коре при звездотрясениях.

В течение первых тысяч лет, пока ядро звезды еще достаточно горячее, темп остывания контролируется процессами, в которых образуются нейтрино, беспрепятственно уносящие энергию в космическое пространство. Главные из них – это так называемые урка-процессы. На их интенсивность огромное влияние оказывает концентрация протонов в ядре, которая по-разному предсказывается разными теоретическими моделями сверхплотной материи, а потому изучение остывания нейтронных звезд служит инструментом проверки этих моделей. Урка-процессы играют важную роль в тепловом балансе большинства звезд. Они состоят из последовательных бета-распадов и бета-захватов, при первом из которых нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино, а при втором протон и электрон превращаются в нейтрон и нейтрино. Антинейтрино и нейтрино свободно покидают звезду, так что состав вещества в итоге не меняется. Но если нуклоны и электроны сильно вырождены, как в ядре нейтронной звезды, то такие процессы могут идти только с участием тех частиц, импульсы которых близки к их импульсам Ферми (иначе реакции блокируются принципом Паули). А поскольку импульсы Ферми определяются концентрациями частиц, то для одновременного выполнения законов сохранения энергии и импульса концентрация протонов не должна быть

слишком мала. В противном случае вместо прямых урка-процессов идут модифицированные, в которых участвует дополнительный нуклон-посредник, обеспечивающий выполнение законов сохранения. Энерговыделение в модифицированных урка-процессах на несколько порядков слабее, чем в прямых. Теоретических модели предсказывают, что концентрация протонов зависит от плотности. Согласно многим современным моделям, в массивных нейтронных звездах концентрация протонов может быть достаточно высока, чтобы работали прямые урка-процессы. Тогда эти звезды остывают гораздо быстрее, чем звезды с меньшей массой. Поэтому сравнение измеренных масс, возрастов и температур нейтронных звезд с теоретическими кривыми остывания позволяет судить о правдоподобности тех или иных теоретических моделей вещества.

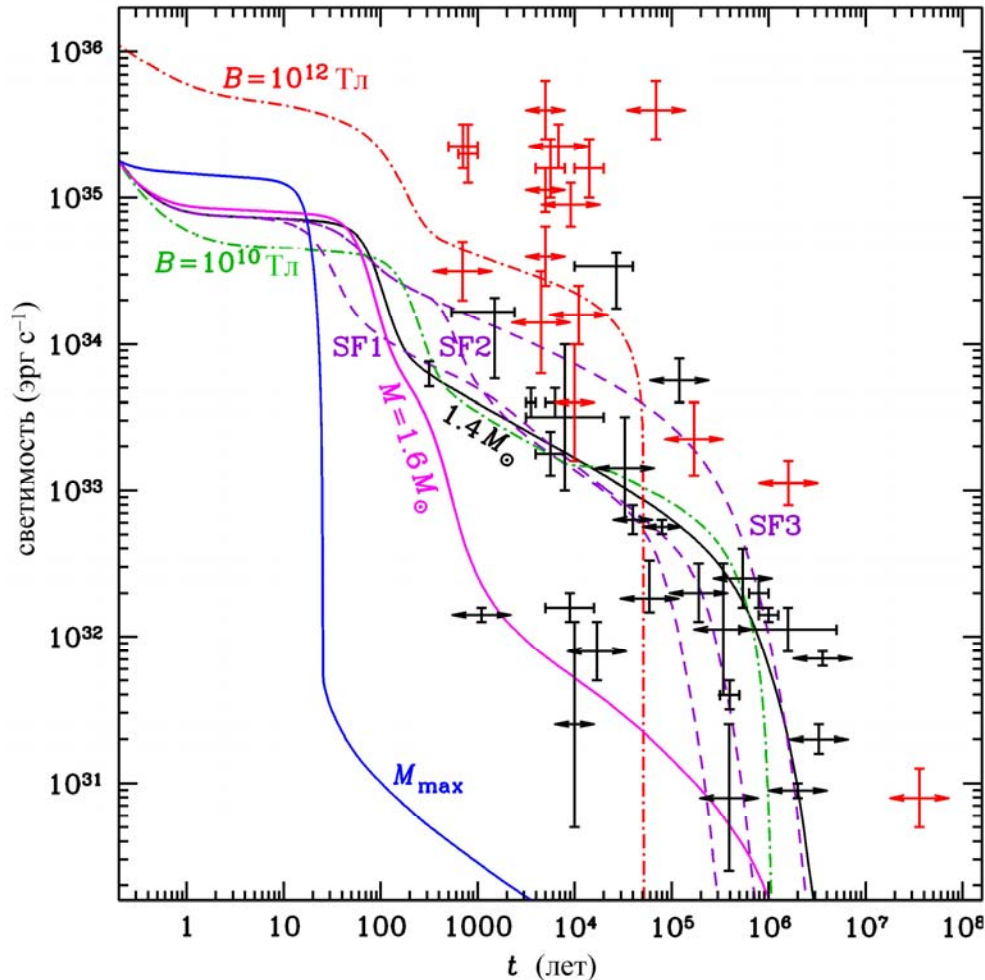


Рисунок 12. Кривые остывания нейтронных звезд (зависимости светимости, уменьшенной за счет красного смещения, от возраста) при разных теоретических предположениях в сравнении с данными наблюдений. Сплошные кривые – немагнитные нейтронные звезды разной массы без учета барионной сверхтекучести; штриховые кривые – три разные модели сверхтекучести; штрихпунктирные кривые – два значения сверхсильного магнитного поля. Отрезки погрешностей отображают оценки возрастов и наблюдаемых тепловых светимостей (черные – для обычных нейтронных звезд, красные – для магнитаров); горизонтальные стрелки заменяют отрезки погрешностей для объектов с ненадежными оценками возрастов.

(Рисунок автора из статьи A.Y. Potekhin and G. Chabrier, 2018, *Astron. Astrophys.*, 609, A74.)

Кроме процессов остывания, в нейтронной звезде действуют различные процессы нагрева. Иногда они способны конкурировать с теплом, поставляемым на поверхность

звезды из ее ядра. Некоторые из них упоминались выше: это нагрев полярных шапок пульсаров магнитосферными токами, выделение энергии при аккреции, а также различные процессы, связанные с эволюцией магнитного поля и поддерживающих его электрических токов. Возможны и другие механизмы нагрева – например, реакции между элементарными частицами, спровоцированные изменением химического равновесия при уменьшении центробежных сил из-за замедления вращения звезды (так называемые ротохимические реакции). У некоторых нейтронных звезд зарегистрированы намного более высокие тепловые светимости, чем предсказывает теория остывания. В таких звездах должны работать мощные процессы внутреннего нагрева. Особенно это характерно для магнитаров.

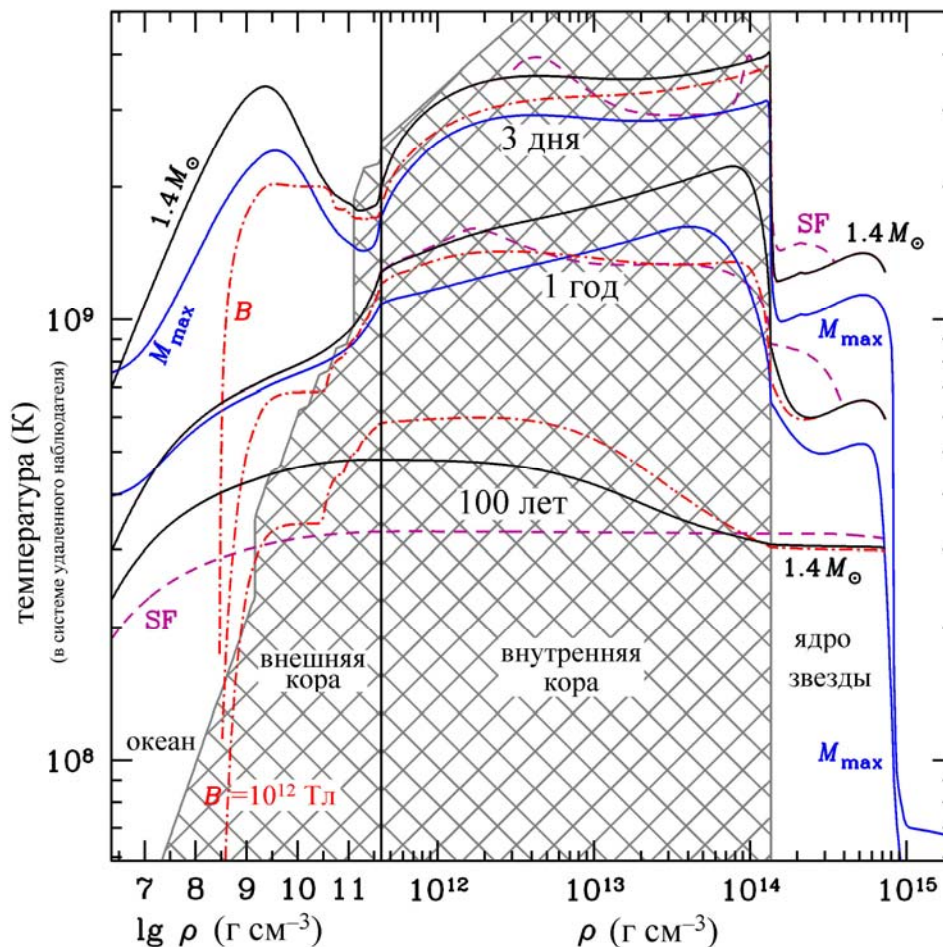


Рисунок 13. Распределение температуры внутри некоторых из нейтронных звезд, кривые остывания которых показаны на предыдущем рисунке, при возрастах 3 дня, 1 год и 100 лет. Сплошные кривые – нейтронные звезды без сильного магнитного поля и без сверхтекучести (звезда с массой $1,4 M_{\odot}$ с минимальным охлаждением – черные кривые; звезда с ускоренным охлаждением внутренней части ядра – синие кривые). Штриховые кривые – нейтронная звезда с массой $1,4 M_{\odot}$ и со сверхтекучестью нуклонов, соответствующей модели SF2 на предыдущем рисунке. Штрихпунктирные кривые – случай магнитара с $B=10^{12}$ Тл. В последнем случае обрыв кривых в левой части графика обусловлен тем, что в сверхсильном поле вместо протяженной атмосферы возникает плотная излучающая поверхность. В заштрихованной области атомные ядра образуют кристаллическую структуру.

(Рисунок автора из статьи A.Y. Potekhin & G. Chabrier, 2018, *Astron. Astrophys.*, 609, A74.)

Магнитные поля

Как мы отмечали выше, большинство известных нейтронных звезд обладают сильными магнитными полями. Предлагались различные теоретические модели генерации поля с участием дифференциального вращения, конвекции, магнито-вращательной неустойчивости и термомагнитных эффектов либо при взрыве и коллапсе сверхновой, либо в молодых нейтронных звездах. Но каждая из моделей сталкивается с определенными трудностями при сопоставлении со всей совокупностью наблюдательных данных.

Электрические токи, поддерживающие магнитное поле звезды, могут протекать либо во внутренней коре, либо в ядре звезды, то есть там, где электропроводность достаточно высока, чтобы поле не распалось в течение времени, сопоставимого с возрастом известных пульсаров. Если магнитное поле имеет источник в ядре звезды, то сверхпроводимость протонов должна приводить к образованию магнитных трубок – вихрей Абрикосова, имеющих микроскопические поперечные размеры.

В процессе эволюции нейтронной звезды ее магнитное поле меняется. Эти изменения зависят от многих факторов и взаимосвязанных физических процессов. Происходит омический распад поля, изменение его конфигурации вследствие холловского дрейфа, возможны пересоединения магнитных силовых линий при звездотрясениях. Термоэлектрические эффекты, а также зависимость тензоров теплопроводности, электропроводности и термоэлектрических коэффициентов от температуры и магнитного поля приводят к взаимозависимости магнитной и тепловой эволюции. Аккреция также может сильно влиять на магнитное поле вблизи поверхности.

Если магнитное поле имеет своим источником вихри Абрикосова, то его эволюция во многом определяется их взаимодействием с другими составляющими ядра, в частности – с вихрями Фейнмана – Онзагера в нейтронной сверхтекучей жидкости, а также условиями на границе ядра, то есть взаимодействием этих вихрей с веществом коры.

В сверхсильном поле становятся важны специфические эффекты квантовой электродинамики, такие как поляризация электрон-позитронного вакуума. При этом вакуум приобретает свойства двулучепреломляющей среды, что существенно влияет на спектр и особенно на поляризацию наблюдаемого излучения нейтронной звезды.

Итак, нейтронные звезды – настоящий клад экстремальных состояний вещества. В них переплетены загадки природы, относящиеся, казалось бы, к далеким друг от друга областям – физике космоса и микромира, гигантских гравитирующих масс и элементарных частиц. Это делает нейтронные звезды уникальными космическими лабораториями для проверки концепций фундаментальной физики. Последние полвека, прошедшие после открытия нейтронных звезд, их теория и наблюдения развиваются быстрыми и все ускоряющимися темпами. Это обусловлено как успехами теоретической и экспериментальной физики, так и впечатляющим прогрессом наблюдательной астрономии и теоретической астрофизики. В обозримом будущем появятся новые инструменты, такие как проектируемые сейчас орбитальные обсерватории, обладающие возможностью проведения рентгеновской поляриметрии. Несомненно, они позволят совершить очередной качественный скачок в понимании нейтронных звезд, а как следствие – в развитии фундаментальной физики.