

Физика нейтронных звезд

А.Ю. ПОТЕХИН,
доктор физико-математических наук
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

В 2018 г. исполнилось 85 лет теоретическому предсказанию существования нейтронных звезд (Земля и Вселенная, 1985, № 2; 1992, № 3; 2000, № 6). Это – самые плотные из известных звезд, что делает их уникальными и по многим другим параметрам. Такие параметры, как плотность и давление вещества в их недрах, ускорение силы тяжести на поверхности, напряженность магнитного



поля несравнимы с теми, которые когда-либо были созданы человеком в лаборатории или природой в иных наблюдаемых объектах. Поэтому нейтронные звезды стали бесценными естественными 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 $M \sim 1\text{--}2 M_{\odot}$, 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/с², 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/см³. Столь плотное вещество нель-

зя получить в лаборатории, и его свойства не ясны. 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 исследования 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. У белых карликов гравитационному сжатию противостоит давление вырожденных электронов, у кварковых звезд – давление материи, состоящей из кварков, не сгруппированных в адроны. Белые карлики, крошечные по сравнению с обычными звездами, при массе примерно 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.

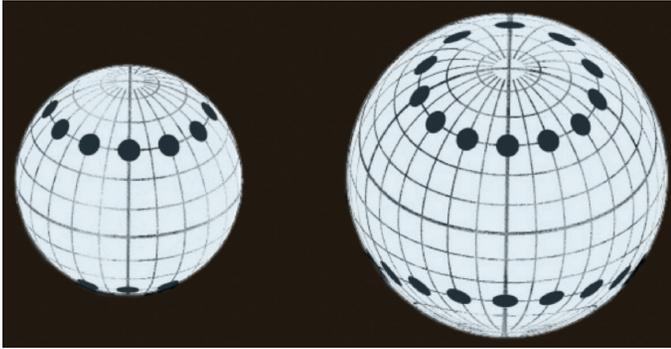
Нейтронные звезды рождаются при взрывах сверхновых звезд II типа (Земля и Вселенная, 1998, № 2; 2008,

№ 1). 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 предела Чандрасекара – максимальной массы, гравитационному сжатию которой еще способно противостоять давление вырожденных электронов. Тогда наступает коллапс. Выделение гигантской гравитационной энергии (около 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 (Земля и Вселенная, 2010, № 3; 2016, № 4). При рождении нейтронной звезды большую часть выделившейся гравитационной энергии уносят нейтрино, около 1% переходит в кинетическую энергию разлетающихся газопылевых 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 уготована лишь достаточно массивным звездам, с массами более $8M_{\odot}$. 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.

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 наблюдателю «заглянуть за горизонт»



Искажение вида звезды из-за искривления траектории фотонов. Звезда, которая в отсутствие эффектов ОТО выглядела бы так, как на рисунке слева, с их учетом выглядит так, как на рисунке справа. Наблюдаемый радиус увеличивается, и становится видна часть поверхности, которая была скрыта за горизонтом. Рисунок NASA/GSFC.

нейтронной звезды. Отсюда вытекают два взаимосвязанных следствия: во-первых, количественная теория нейтронных звезд должна быть релятивистской; 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 поля-

ми – достигают $10^{10} - 10^{11}$ Тл у поверхности, 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 г. Вальтером Бааде (Земля и Вселенная, 1969, № 1) и Фрицем Цвикки. Они же предложили и сам термин "сверхновая" для того, чтобы отличать эти необычайно яркие объекты от более многочисленных Новых. Как теперь известно, Новые звезды возникают из-за термоядерного горения вещества, осевшего на поверхность белых карликов. Сверхновые же, как догадались В. Бааде и Ф. Цвикки, вспыхивают при гравитационном коллапсе, а сжатое вещество образует нейтронную звезду.

Нейтронные звезды больше 30 лет после своего предсказания оставались гипотетическими объектами, так как астрономия того времени

не располагала инструментами, которые позволили бы их обнаружить. Но они привлекли внимание теоретиков. В 1938 г. 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 со своим учеником Джорджем (Георгием) Волковым вывели уравнение гидростатического равновесия сферически симметричного тела в ОТО. На этой основе Р. Оппенгеймер и Г. 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 г., используя значительно развитую к тому времени теорию ядра, канадский астрофизик Аластер Кэмерон получил первую реалистичную оценку $M_{\max} \sim 2M_{\odot}$. Он же первым указал на то, что в ядре нейтронной звезды могут присутствовать гипе-

роны (барионы, содержащие "странные" кварки). В том же году член-корреспондент АН СССР А.Б. Мигдал отметил возможную сверхтекучесть нуклонов в нейтронной звезде. В середине 1960-х гг. были проведены первые расчеты нейтринного излучения из недр нейтронной звезды и ее остывания (немалый вклад в эти исследования внес Аластер Кэмерон). В те же годы академик В.Л. Гинзбург предсказал наличие у нейтронных звезд магнитного поля порядка 10^8 Тл, а доктор физико-математических наук Н.С. Кардашёв – 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 (или миллионы) градусов, а значит, должна испускать тепловое излучение – в основном в виде мягких рентгеновских лучей. Надежды обнаружить такое излучение появились с зарождением рентгеновской астрономии в начале 1960-х гг., однако фактически тепловые рентгеновские компоненты в спектрах нейтронных звезд стали уверенно регистрировать лишь в 1990-х гг. – после запуска 1 июня 1990 г. немецкой космической обсерватории "ROSAT" с рентгеновским телескопом, передавшим более 150 тыс. изображений

рентгеновских источников с разрешением в несколько угловых секунд. В XXI в. измерения рентгеновских спектров вышли на качественно новый уровень благодаря работе космических обсерваторий "ХММ-Ньютон" и "Чандра" (Земля и Вселенная, 2014, №№ 4, 5; 2017, № 4).

Впервые нейтронные звезды обнаружили себя как радиопульсары, первый из них был открыт в 1967 г. группой радиоастрономов в Кембридже (Великобритания). Молодая сотрудница этой группы Джоселин Белл обнаружила странные сигналы в записях радиотелескопа. Таинственные импульсы повторялись с исключительно стабильным периодом, равным 1,33 с (Земля и Вселенная, 1970, № 4). Вскоре она открыла еще несколько похожих радиоисточников. Объяснение им дал американский астроном Томас Голд, предложив модель этого феномена – быстро вращающейся нейтронной звезды с сильным магнитным полем. Она окружена протяженной плазменной магнитосферой, наполненной заряженными частицами, при этом генерируется когерентное направленное радиоизлучение, благодаря которому нейтронная звезда может наблюдаться как пульсар, если при ее вращении конус излучения "пересекает" луч зрения наблюдателя.

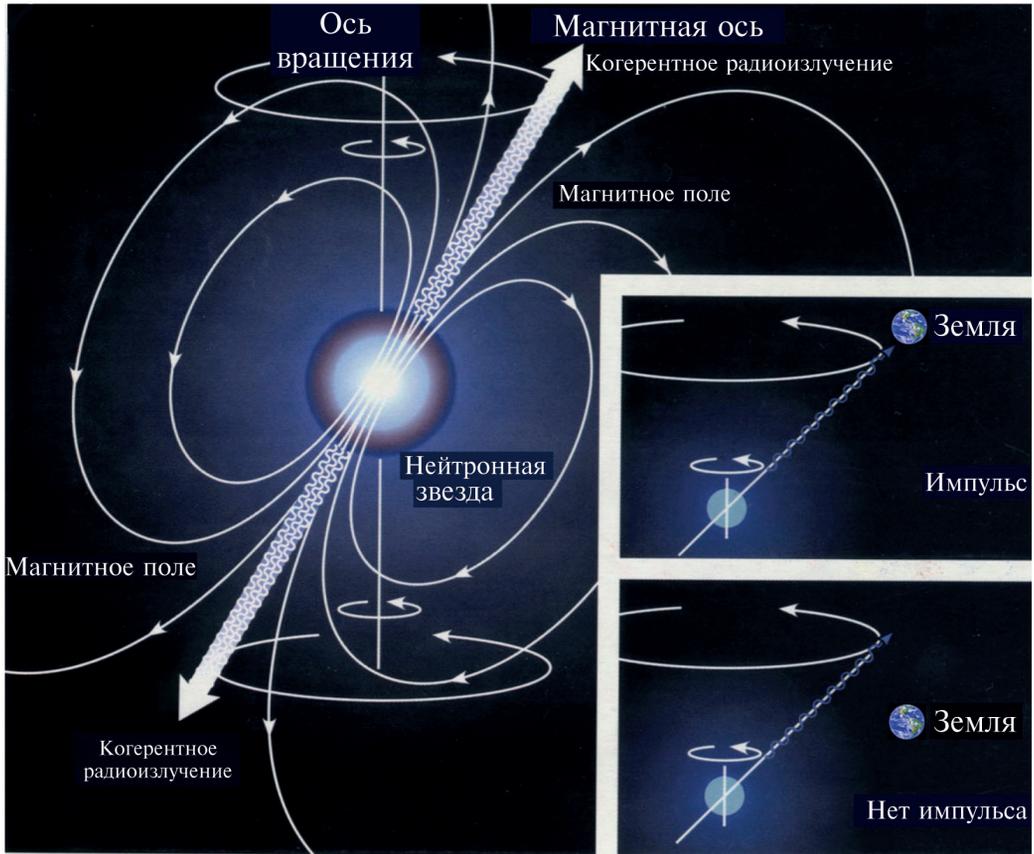
Еще до обнаружения пульсаров член-корреспондент АН СССР И.С. Шкловский сопоставил рентгеновские и опти-

ческие 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. Теперь ежегодно появляется более тысячи посвященных им публикаций, а раз в несколько лет происходит открытие нового класса астрономических объектов, содержащих нейтронные звезды. В 1971 г. были открыты рентгеновские пульсары, в 1975 г. – барстеры (источники рентгеновских всплесков), в 1979 г. – источники мягких повторяющихся гамма-всплесков, в 1982 г. – миллисекундные пульсары, в 1996 г. – "радиотихие" изолированные нейтронные звезды, в 1998 г. – аномальные рентгеновские пульсары (о них будет речь ниже), в 2006 г. – быстрые радиотранзиенты (яркие радиопульсары, которые то обнаруживают себя, то исчезают), в 2008 г. – гамма-пульсары.

МНОГООБРАЗИЕ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Нейтронные звезды излучают во всех диапазонах электромагнитного спектра.



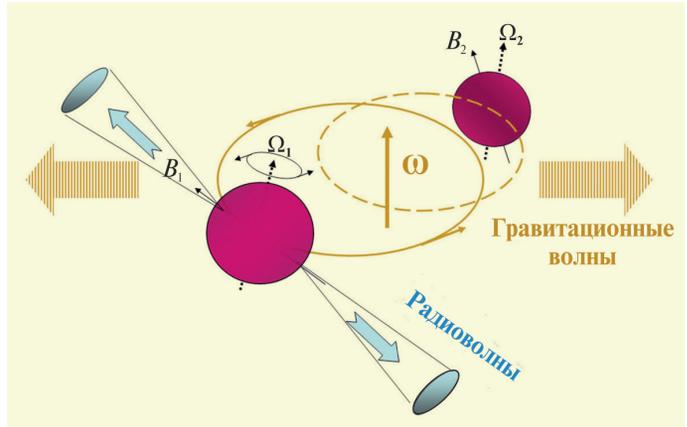
Принцип работы пульсара. На верхней врезке показано, как излучение пульсара "пересекает" луч зрения земного наблюдателя; при этом регистрируется импульс. На нижней врезке показан "молчащий" пульсар, луч которого не "пересекает" Землю. Рисунок Х. Чен, доработанный автором.

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 при-

лизительно 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 пульсаций составляет несколько секунд или десятых долей секунды, возраст пульсара 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 оцениваются как $B \sim 10^4 - 10^6$ Тл. Когда-то они входили в состав двойных систем с аккрецией. Перетекавшее на них вещество "приносило с собой" угловой

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.



момент, ускоряя вращение, и способствовало затуханию магнитного поля.

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. Если вторая звезда в двойной системе тоже компактная (нейтронная звезда или белый карлик), то кроме обычных кеплеровских параметров орбиты, нередко удастся измерить параметры двойной системы, связанные с эффектами ОТО, – изменением углового момента из-за излучения гравитационных волн, смещением периастра, геодезической прецессией, задержкой фотонов при их прохождении вблизи звезды-компаньона (эффект Ша-

пиро). В таких случаях массы обеих звезд измеряются с высокой точностью, а ОТО неизменно получает дополнительное подтверждение.

Около 8% известных нейтронных звезд входит в состав двойных систем с аккрецией и проявляет себя рентгеновским излучением аккреционного диска, а также вспышками, возникающими из-за взрывного термоядерного горения аккрецированного вещества во внешних слоях звезды. Существуют два вида таких систем – это маломассивные рентгеновские двойные системы, в которых компаньон – звезда-карлик (белый или красный) с массой не более $2M_{\odot}$, и массивные двойные, в которых масса звезды-компаньона в несколько (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 излучение нагретой поверхности звезды.

Зарегистрировано также и рентгеновское излучение более 100 изолированных нейтронных звезд. Часто такое излучение возникает в результате ускорения частиц в магнитосфере звезды. У некоторых нейтронных звезд (их известно более 40)

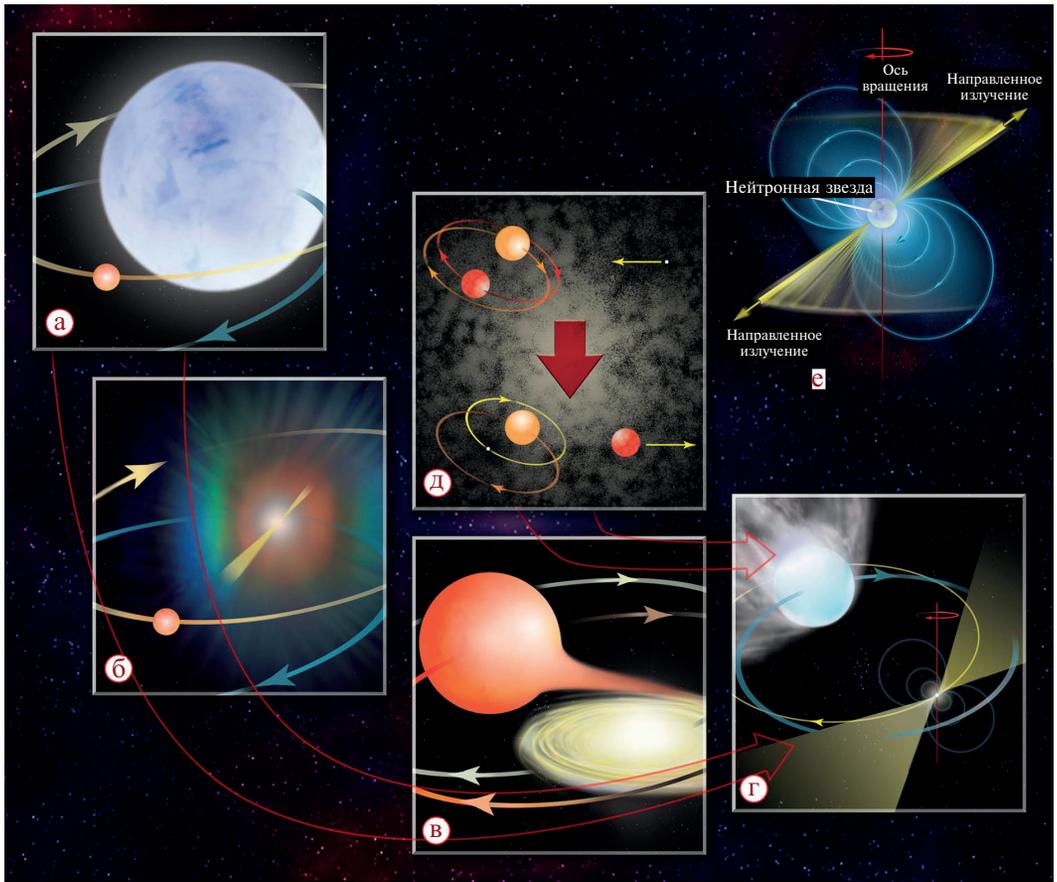
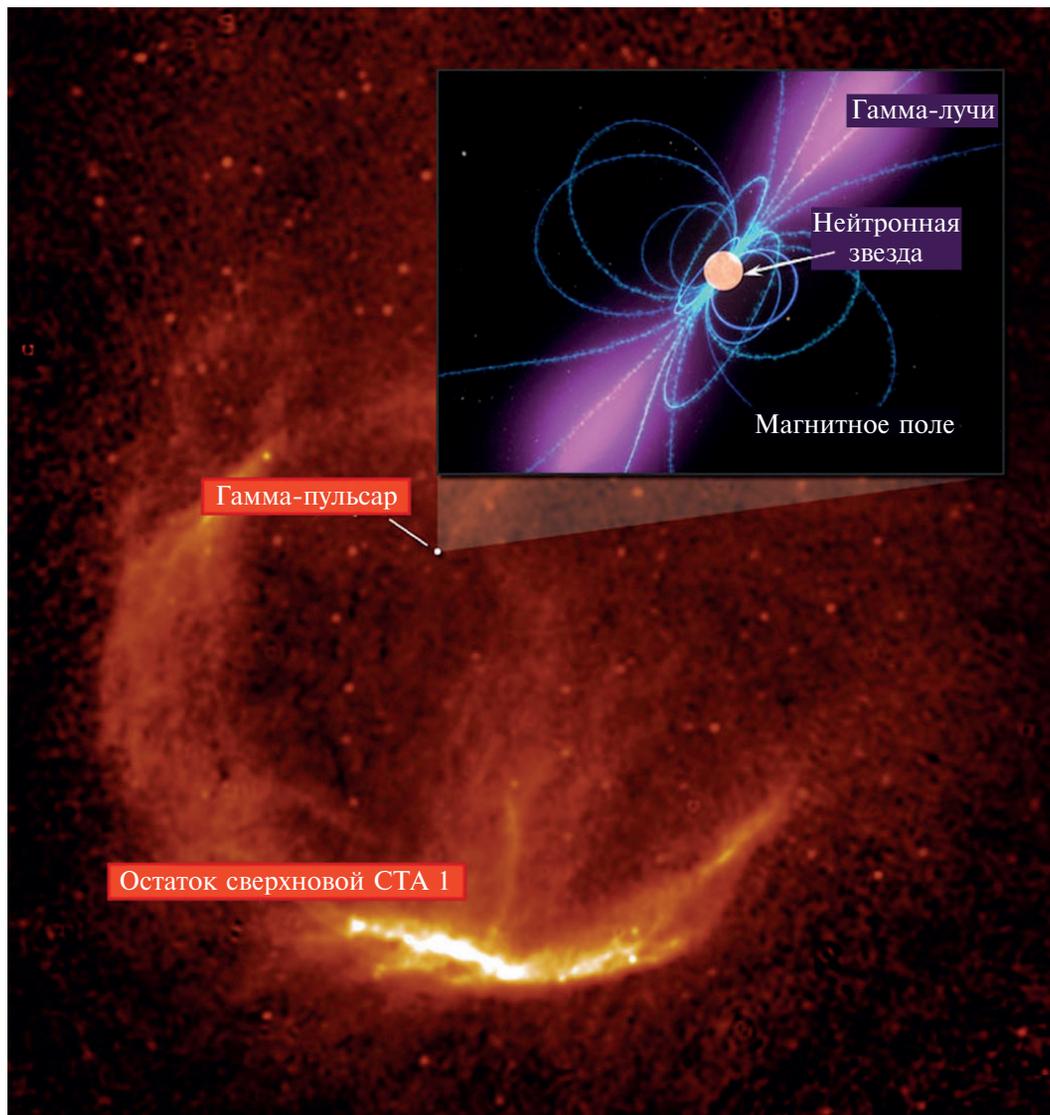


Схема возникновения рентгеновской двойной системы и миллисекундного пульсара (во врезках): а – звезда-сверхгигант и звезда Главной последовательности обращаются вокруг общего центра масс; б – массивная звезда, "израсходовав" свое ядерное горючее, взрывается как сверхновая; на ее месте остается нейтронная звезда; в – двойная система переживает взрыв сверхновой; звезда меньшей массы продолжает свою эволюцию и через миллиарды лет становится красным гигантом; г – момент окончания аккреции; нейтронная звезда становится миллисекундным пульсаром; д – процесс обмена двойной системы с одиночной звездой (вариант эволюции); е – миллисекундный пульсар с магнитным полем и излучением. Рисунок NRAO/NSF.

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 «поляр-

ных шапок» (магнитное поле почти перпендикулярно к поверхности звезды), нагретых до нескольких миллионов градусов. Именно над ними генерируется сверхсильное электрическое поле, которое ускоряет заряженные частицы; часть из них бомбарди-

рует поверхность, нагревая ее. Мягкая рентгеновская тепловая составляющая спектра соответствует излучению остальной, менее горячей поверхности, которое может порождаться теплом, приходящим из ее недр. Распределение этого

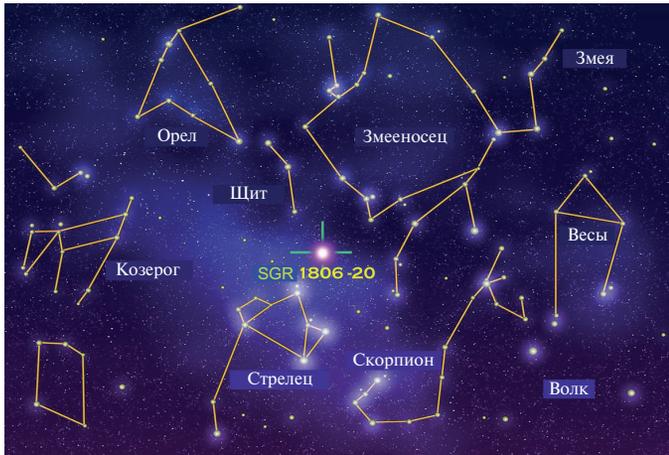


Расширяющийся остаток сверхновой СТА 1, располагающийся на расстоянии около 4600 св. лет от нас в созвездии Цефея. Вблизи его центра находится гамма-пульсар (его художественное представление помещено во врезке) – вращающаяся нейтронная звезда, излучающая направленные пучки гамма-лучей. Рисунок NASA/C. Пино (DRAO).

тепла по поверхности также неоднородно, потому что меняется теплопроводность коры звезды, зависящая от величины магнитного поля и его направления.

В отличие от нормальных и миллисекундных рентгеновских пульсаров, многие из которых входят в состав двойных систем, аномальные рентгеновские пульсары (сок-

ращенно АХР – anomalous X-ray pulsar) являются изолированными и обладают необычно долгими периодами – 6–24 с, но при этом имеют высокую рентгеновскую светимость.



Положение на небе источника "мягких" повторяющихся гамма-всплесков SGR 1806-20; 27 декабря 2004 г. он стал источником гамма-вспышки рекордной мощности. Рисунок NASA/GSFC.

Их периоды сравнительно быстро увеличиваются, указывая на то, что эти объекты обладают магнитными полями, превышающими 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. Природа этих объектов еще не до конца ясна.

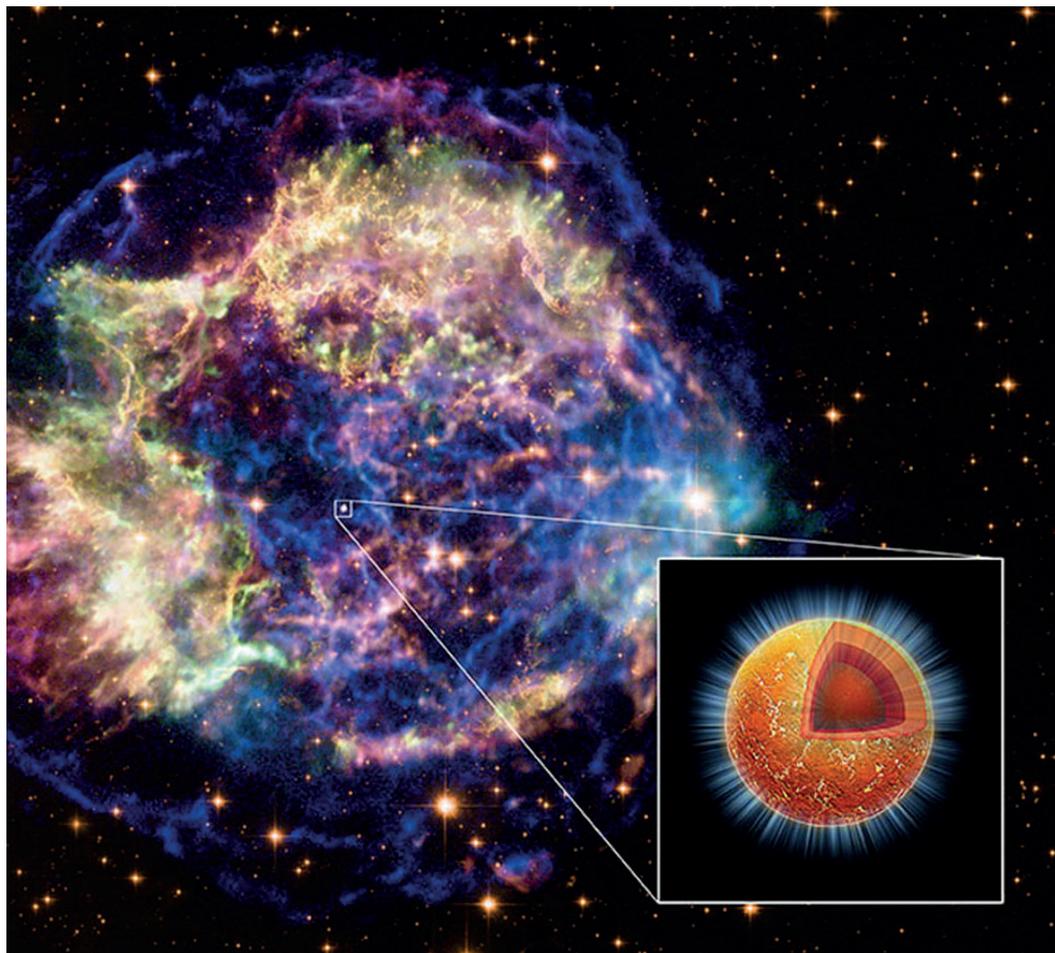
По своим свойствам к АХР очень близки источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR – soft gamma repeater). Первоначально эти два класса были разделены, потому что их наблюдательные проявления были различны. Однако со временем выяснилось, что некоторые АХР так же, как SGR, время от времени производят 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, но ни одна из них не является твердо установленной.

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

в излучении трех из них обнаружены пульсации, периоды которых довольно малы (0,1–0,42 с) и при этом весьма стабильны. Это указывает на то, что ЦКО имеют не слишком сильное крупномасштабное магнитное поле (около 10^7 Тл). С другой стороны, большая амплитуда пульсаций указывает на неоднородное распределение температуры по поверхности (по-видимому, в коре звезды скрыто сверхсильное тороидальное магнитное поле). С 2001 г. известны ровно семь XINS, в связи с чем их прозвали "великолепной семеркой"; предполагается, что это продукты эволюции магнитаров. Их периоды длиннее, чем у большинства обычных пульсаров – 3–16 с, магнитные поля имеют довольно высокие значения: $B \sim 10^9$ – 10^{10} Тл.

Экзотический рентгеновский источник 1RXS J14-1256.0+792204 с периодом 59 мс, открытый в 2008 г. и названный "Кальверой" (находится на расстоянии 250–1000 св. лет от нас в Малой Медведице), сначала рассматривался как возможный восьмой объект со свойствами XINS, но потом оказалось, что он близок по своим свойствам к ЦКО и имеет поле $B \sim 4 \times 10^7$ Тл.



Остаток сверхновой Кассиопея А, в центре которого находится "радиотихая" остывающая нейтронная звезда – центральный компактный объект с углеродной атмосферой (во врезке).
 Рисунок: NASA/CXC/STScI/ UNAM/Д. Паж, П.С. Штернин, М. Вейсс.

ЗАГАДКИ ЯДРА НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

В нейтронной звезде выделяются две основные качественно отличные области – ядро (внешнее и внутреннее) и оболочка (твердая кора, жидкий океан и атмосфера). Вещество внешнего ядра, составляющего большую долю массы типичной

нейтронной звезды, представляет собой нейтронную жидкость с примесью протонов, электронов и μ -мезонов (мюонов); причем все составляющие чрезвычайно вырождены. Внутреннее ядро есть только у достаточно массивных нейтронных звезд с массами не менее $1,5M_{\odot}$, оно занимает центральную область с плотнос-

тью больше $\rho = 2\rho_0$, 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 в значительной степени зависит от используемого теоретического аппарата; поэтому исследование нейтронных

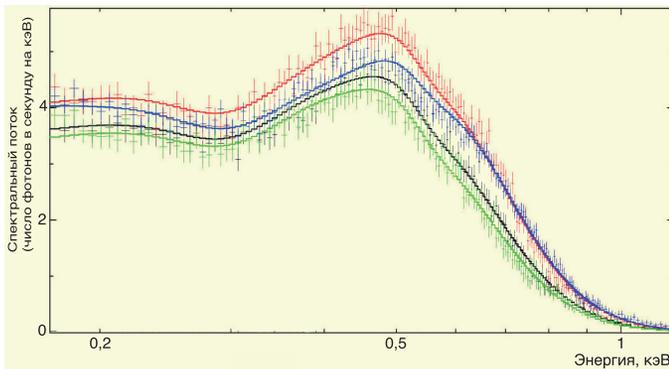


График сравнения наблюдаемого рентгеновского спектра одного из представителей "великолепной семерки" – RBS1223, находящегося в созвездии Волосы Вероники (отрезки погрешностей), для четырех фаз вращения с результатами расчетов (кривые), выполненными с помощью модели частично ионизированной водородной атмосферы с сильным магнитным полем, расположенной на конденсированной железной поверхности. Цвета соответствуют четвертям полного периода вращения. По данным V. Hambaryan et al., 2011, A&A 534, A74.

звезд важно не только для астрофизики, но и для физики ядра и элементарных частиц. Рассматриваются такие теоретические возможности: появление различных гиперонов; образование бозонного конденсата из коллективных возбуждений, имеющих свойства π - или K -мезонов (пионов или каонов); деконфайнмент (confinement – удержание, заточение) – фазовый переход к кварковой материи.

В ядре нейтронной звезды адроны (во внешнем ядре – нуклоны) образуют сильно взаимодействующую вырожденную жидкость, а лептоны (электроны и мюоны) представляют собой почти идеальный вырожденный газ. Рассчитать свойства этого вещества довольно сложно, для этого применяются различные упрощения. Исследования 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 от 10^8 до 10^{10} К. Сверхтекучие протоны образуют сверхпроводящую жидкость. Сверхтекучесть влияет на теплоемкость, на теплопроводность и на скорость реакций, приводящих к излучению нейтрино и остыванию ядра звезды.

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. Их оболочки различаются по своему составу, агрегатному состоянию и по своей роли в эволюции звезды и ее свойствах.

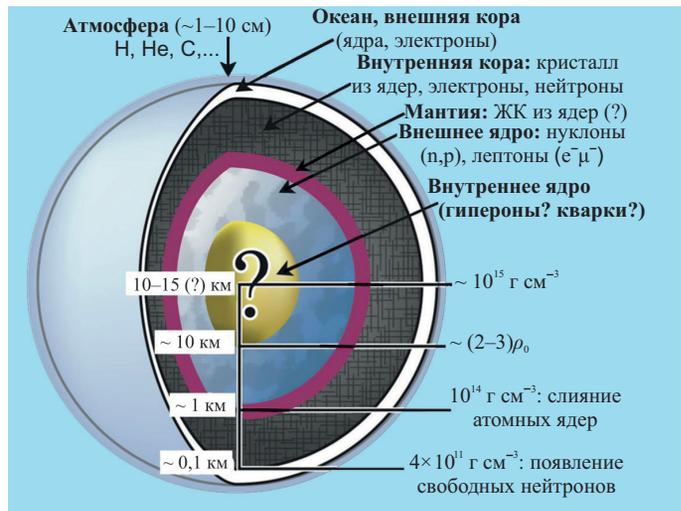
Вещество самых нижних оболочек, примыкающих к ядру нейтронной звезды, представляет собой жидкость из нейтронов и электронов, в которую погружены атомные ядра. Нейтроны и электроны в этих слоях сильно вырождены, а ядра являются нейтронно-избыточными – число нейтронов в них может в несколько раз превышать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

Строение нейтронной звезды. Указана ядерная плотность ρ и ρ_0 (в г/см³) ее внутренних слоев. Рисунок NASA/GSFC, доработанный автором.

рует твердую кору. Между корой и ядром звезды может находиться мантия (ее существование предсказывается не всеми 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 внешнюю и внутреннюю. Внешняя кора отличается отсутствием свободных нейтронов. 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 этой жидкости.

Особое значение имеет теплоизолирующая оболочка, определяющая плотность потока фотонов, испускаемых нейтронной звездой. Главным регулятором этого потока служит теплопроводность в "полоске чувствительности", играющей роль своего рода "бутылочного горлыш-

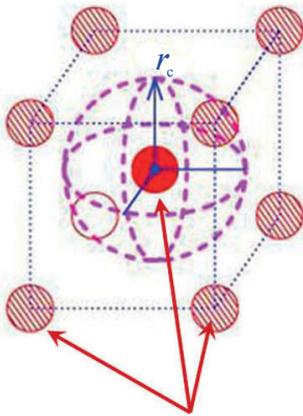


ка", через которое тепло просачивается наружу. Положение "полоски чувствительности" зависит от массы и радиуса звезды, ее температуры, магнитного поля и химического состава оболочки. Поскольку теплоперенос поперек сильного магнитного поля затруднен, то ее глубина залегания может меняться: там, где поле сильнее наклонено к поверхности, она расположена глубже. Как правило, она охватывает нижний слой "океана" и верхнюю часть коры, ее плотность $\rho \sim 10^9 - 10^9$ г/см³.

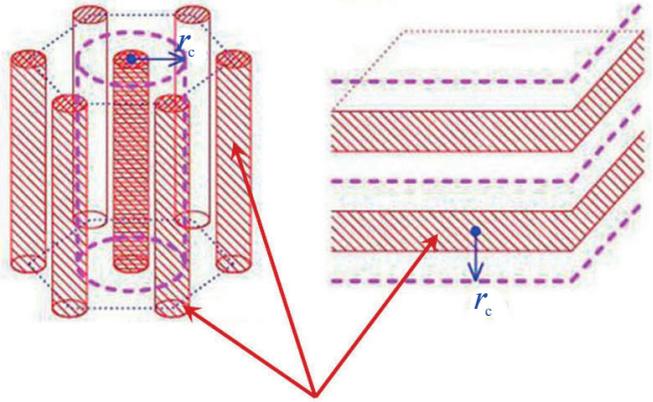
Когда с уменьшением плотности электростатическая энергия ионов и электронная энергия Ферми становятся меньше кинетической энергии ионов, вырожденная кулоновская жидкость превращается в невырожденный газ. Внешняя оболочка звезды, в которой формируется электромагнитный спектр, играет роль фотосферы. Из-за гигантского тяготе-

ния 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 оболочки 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 на звезду в результате аккреции. 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



Сферические атомные ядра



Экзотические атомные ядра

Расположение атомных ядер в коре нейтронной звезды: слева – в объемно-центрированной кубической решетке; справа – в мантии звезды (цилиндрические и плоские ядра) образуются жидкокристаллические структуры. Вектор r_c – радиус объема, приходящегося на одно ядро. Рисунок автора.

температура ее поверхности превышала несколько миллионов градусов), то водород мог продиффундировать в более плотные и горячие области и там сгореть в ходе термоядерных реакций, "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 в результате исследований можно отве-

тить на вопрос: из какого вещества состоит атмосфера той или иной нейтронной звезды.

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 ситуация, когда над конденсированной поверхностью находится атмосфера, которая может быть оптически толстой для одних длин волн и прозрачной для других.

ТЕПЛОВАЯ ЭВОЛЮЦИЯ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

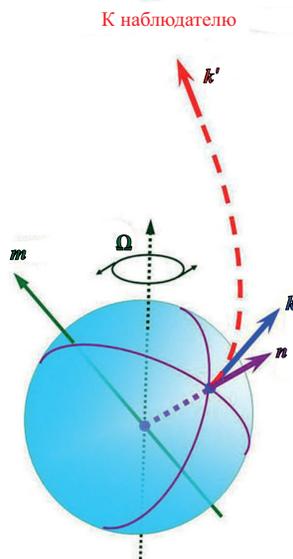
Нейтронная звезда рождается с температурой выше 10^{10} К и затем остывает – сначала быстро, а потом все медленнее, освобождая энергию посредством нейтринного излучения из своих недр и электромагнитного излучения с поверхности. Кора звезды поначалу остается более горячей, чем ядро. Волна охлаждения достигает 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 и антинейтрино, беспрепятственно "уносящие" энергию в космическое пространство. Главные из них – это урка-процессы (состоят из последовательных бета-распадов и бета-захватов), играющие важную роль в тепловом балансе большин-

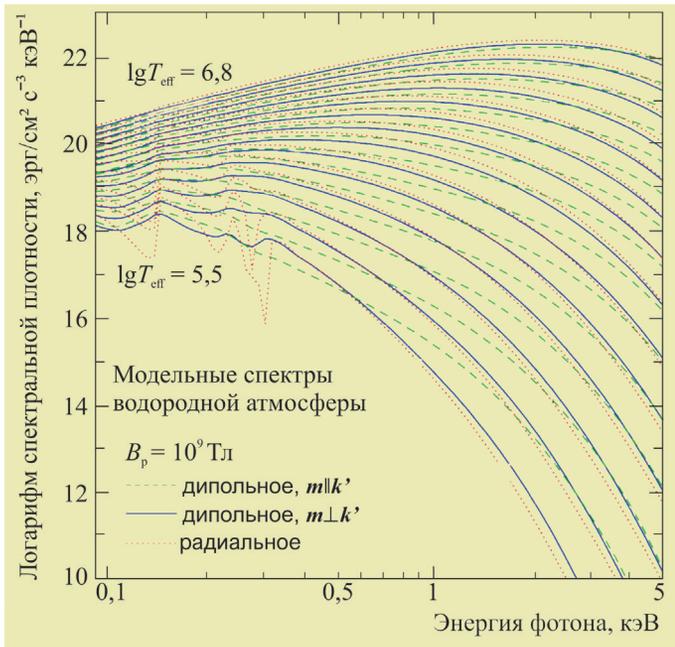
ства звезд. Но в нейтронных звездах (в отличие от обычных) на их интенсивность оказывает огромное влияние концентрация протонов в ядре. Согласно многим современным моделям, в массивных нейтронных звездах концентрация протонов может быть достаточно высока для того, чтобы протекали прямые урка-процессы (то есть такие же, как в обычных, невырожденных звездах). Тогда эти звезды остывают гораздо быстрее, чем звезды с меньшей массой, в которых происходят гораздо более слабые модифицированные урка-процессы (то есть такие, в которых участвует дополнительный нуклон). Поэтому сравнение измеренных масс, возрастов и температур нейтронных звезд с теоретическими кривыми остывания позво-

ляет судить о правдоподобности теоретических моделей вещества, которые предсказывают ту или иную зависимость концентрации протонов от плотности.

Кроме процессов остывания, в нейтронной звезде "действуют" различные процессы нагрева, например, нагрев полярных шапок пульсаров магнитосферными токами; выделение энергии при аккреции; процессы, связанные с эволюцией магнитного поля; реакции между элементарными частицами, спровоцированные изменением химического равновесия при уменьшении центробежных сил из-за замедления вращения звезды (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.



Формирование спектра нейтронной звезды с сильным магнитным полем. Магнитная ось m , ось вращения Ω и направление на наблюдателя в общем случае различаются, вследствие искривления лучей и гравитационного красного смещения; волновой вектор испущенного фотона k отличается от волнового вектора k' фотона, "приходящего" к наблюдателю. Рисунок автора.



Тепловые спектры нейтронной звезды (T_{eff}) с сильным магнитным полем и водородной атмосферой. В случае дипольного поля спектр меняется при вращении звезды. Спектральные особенности 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 et al., 2008, ApJS. 178, 102.

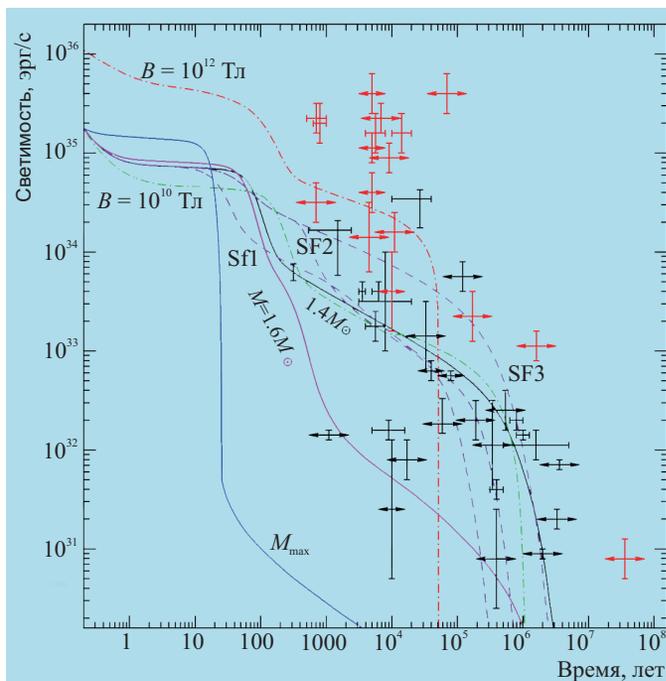
МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Как мы отмечали выше, большинство известных нейтронных звезд обладают сильными магнитными полями. Предлагались различные теоретические модели

График остывания нейтронных звезд: теория и наблюдения (черные отрезки погрешностей – для обычных нейтронных звезд, красные – для магнитаров). Сплошные кривые – немагнитные нейтронные звезды разной массы без учета барионной сверхтекучести; штриховые кривые – для трех моделей сверхтекучести (SF1, SF2, SF3); штрихпунктирные кривые – для двух значений сверхсильного магнитного поля. Рисунок автора (по данным A.Y. Potekhin and G. Chabrier, 2018. A&A 609, A74).

генерации поля при взрыве и коллапсе сверхновой или в молодых нейтронных звезд-

дах: рассматривались такие явления, как дифференциальное вращение, конвекция, магниторотационная неустойчивость и термомагнитные эффекты.

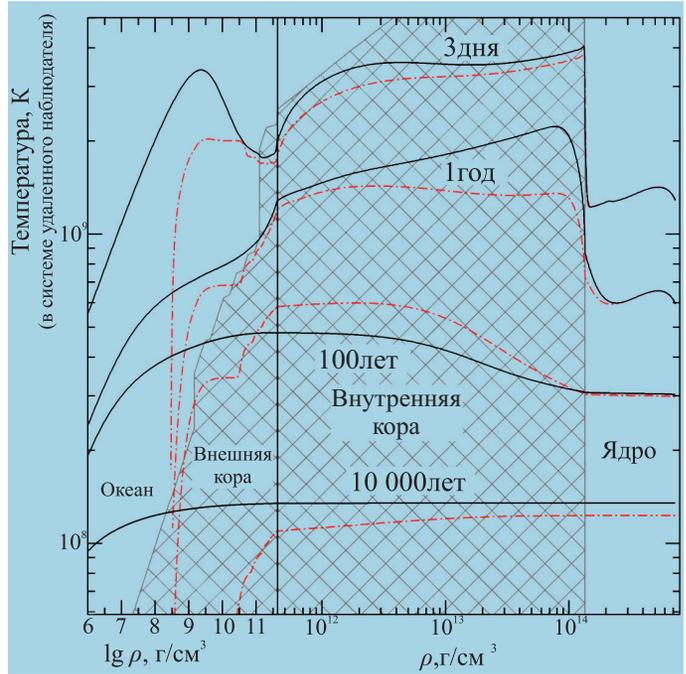


Графики распределения температуры, в зависимости от плотности ρ , внутри обычных остывающих нейтронных звезд (черные сплошные кривые) и магнитаров с конденсированной поверхностью при $B = 10^{12}$ Тл (красные штрихпунктирные кривые) для разных возрастов. Заштрихованная область соответствует твердой коре.

Рисунок автора (по данным А.У. Potekhin and G. Chabrier, 2018. A&A 609, A74).

Электрические токи, "поддерживающие" магнитное поле звезды, могут протекать либо во внутренней коре, либо в ядре звезды: то есть там, где электропроводность достаточно высока, для того 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 в зависимости от многих факторов и взаимосвязанных физических процессов.

В сверхсильном поле становятся важны специфические эффекты квантовой электродинамики – такие, как поляризация электрон-позитронного ваку-



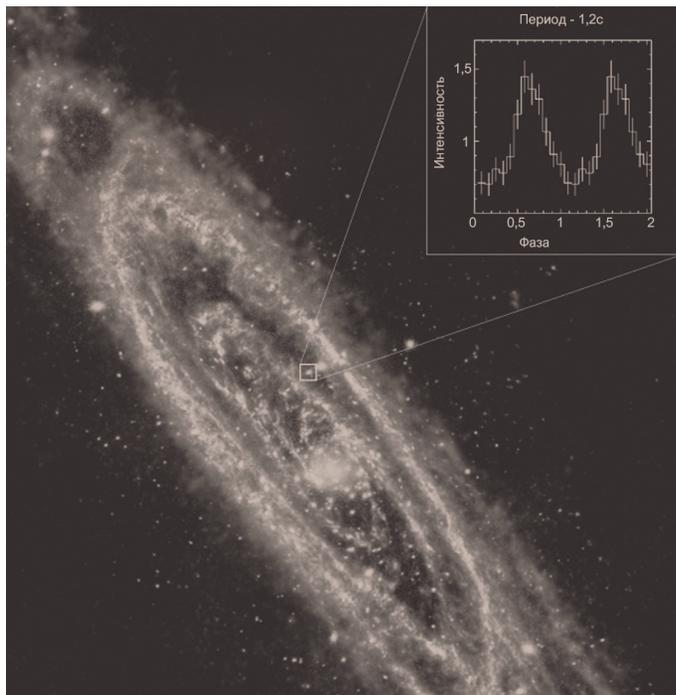
ума. При этом вакуум приобретает свойства двулучепреломляющей среды – среды, в которой коэффициент преломления зависит от поляризации, что существенно влияет на спектр и особенно на поляризацию наблюдаемого излучения нейтронной звезды.

Итак, нейтронные звезды – настоящий "кладезь" 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. В 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 космические обсерватории, обладающие возможностью проведения рентгеновской поляриметрии. Несомненно, они позволят совершить очередной качественный скачок в понимании нейтронных звезд, и, как следствие, – в развитии фундаментальной физики.

Нейтронная звезда в Туманности Андромеды

В рамках проекта EXTRaS (Exploring the X-ray Transient and variable Sky – исследование рентгеновского транзиентного и переменного неба) ведется систематическая обработка данных, полученных с помощью космической обсерватории "XMM-Newton" (ESA). В марте 2018 г. в соседней галактике Туманность Андромеды (M31; 2,52 млн св. лет от нас) был обнаружен источник рентгеновского излучения 3XMM J004301.4+413017. По одной версии – это быстро вращающаяся, с амплитудой 1,2 секунды, нейтронная звезда – пекулярный двойной рентгеновский пульсар, в котором ее компаньон менее массивен, чем Солнце. Нейтронная звезда "питается" соседней звездой, которая вращается вокруг нее каждые 1,3 сут. По другой версии, эта система может быть бинарной, со средней массой, в которой компаньон в два раза массивнее Солнца. Астрономам потребуется провести дополнительные исследования за пульсаром и его компаньоном для того, чтобы определить, какая модель более вероятна. В нашей Галактике есть такого класса объекты, но,



Фрагмент спиральной галактики Туманность Андромеды; указано место, где обнаружена нейтронная звезда. Справа вверху представлен график, который "демонстрирует" кривую светимости источника 3XMM J004301.4+413017. Синтезированный снимок создан в 2016 г. по данным, полученным с помощью космических обсерваторий "XMM-Newton" и "Гершель". Фото ESA/ Herschel/ PACS/SPIRE/J. Fritz/XMM-Newton/EPIC/W. Pietsch.

как и в Туманности Андромеды, их обнаружить до сих пор не удавалось.

Ученые из Института астрофизики пространства и физики космоса (Италия) использовали архивные данные и снимки обсерватории "XMM-Newton". С 2000 по 2010 гг. с помощью камеры EPIC в энергетических диапазонах 0,3–7,0 кэВ, соответствующих длинам 1,8–41,3Å, было произведено несколько десят-

ков наблюдений областей этой галактики с экспозицией больше чем 2 млн секунд (эквивалентных более чем 20 сут). В результате синтеза изображений, полученных обсерваториями "Гершель" и "XMM-Newton" (см. стр. 1 обложки), можно проследить эволюцию звезд в галактике Андромеды.

Пресс-релиз ESA,
31 марта 2018 г.