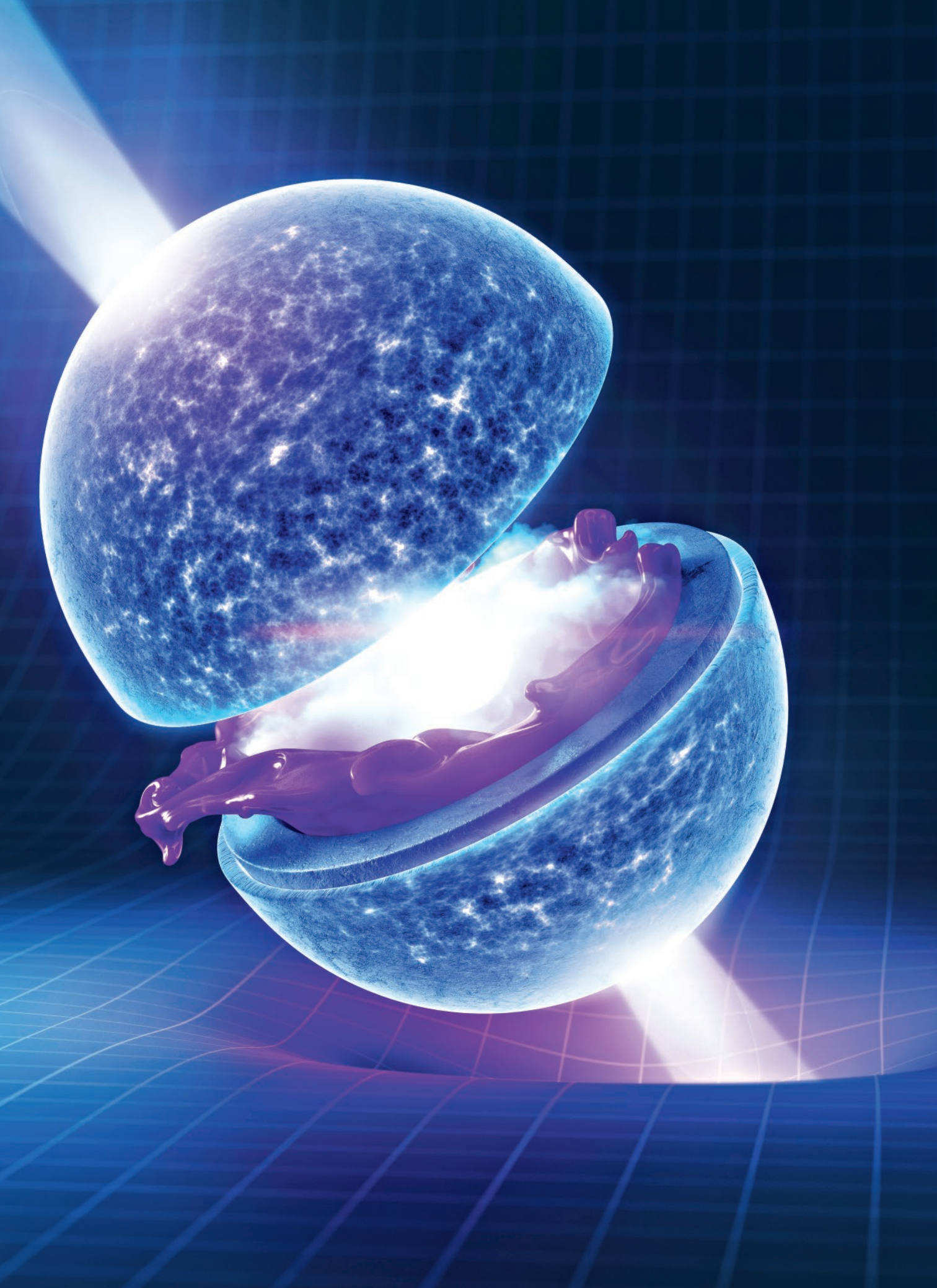


ВНУТРЕННЯЯ ЖИЗНЬ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Недра нейтронных звезд — самой плотной формы вещества во Вселенной — долгое время хранили тайну, которую ученые начинают постигать только сейчас

Клара Московиц

Когда гибнет звезда, размеры которой превышают размер Солнца в 20 раз, она превращается, по словам астрофизика Завена Арзуманяна (Zaven Arzoumanian), в «самый возмутительный объект, о котором большинство людей никогда не слышали». Образуется нейтронная звезда — объект размером с город, обладающий невероятной плотностью. Кусочек нейтронной звезды размерами с теннисный мячик весил бы больше 1 млрд т. Внутри нейтронной звезды под воздействием гравитации протоны и электроны сплавляются друг с другом (*нейтронизация вещества*. — *Примеч. пер.*), в результате чего основная масса звезды складывается из нейтронов, откуда и происходит ее название. Таково в основных чертах наше представление о нейтронных звездах. Однако наше понимание процессов в этих объектах далеко до завершения. Астрономы никогда не наблюдали нейтронные звезды вблизи, ни одна лаборатория на Земле не может создать нечто, обладающее сопоставимой плотностью, и поэтому внутренняя структура нейтронных звезд — одна из величайших космических загадок.



ОБ АВТОРЕ

Клара Московиц (Clara Moskowitz) — редактор журнала *Scientific American*, специализируется на вопросах физики и пространства.



Завен Арзуманян, сотрудник Центра космических полетов им. Годдарда NASA, комментирует: «Это устойчивое вещество с самой высокой плотностью, которую только позволяет природа, и находящееся в конфигурации, которую мы не понимаем». Нейтронные звезды представляют собой наиболее сильно гравитирующую форму известного вещества. Чуть прибавить массы — и нейтронная звезда станет уже черной дырой, которая и веществом-то перестает быть, а представляет собой скорее геометрическую структуру пространства-времени. «То, что происходит на этом пороге, — продолжает Арзуманян, — и есть предмет наших исследований».

Существует несколько конкурирующих теорий о том, что происходит на этом пороге. Согласно одним концепциям, нейтронные звезды действительно полны обычных нейтронов и, возможно, содержат небольшое количество протонов. В других же теориях делаются гораздо более экзотические предположения. Возможно, нейтроны внутри нейтронных звезд разваливаются дальше на составляющие их частицы, называемые кварками и глюонами, которые получают свободу распространяться внутри этих звезд. Возможно даже, внутри последних образуются еще более гипотетические объекты, такие как гипероны — нетипичные частицы, состоящие не из обычно встречающихся в атомах верхнего (*up*) и нижнего (*down*) кварков, а из их более тяжелых родственников — странных кварков.

Не распилив нейтронную звезду и не заглянув внутрь, не найти простого способа узнать, какая же из этих теорий верна. Но ученые добились прогресса. Большой прорыв произошел в августе 2017 г., когда в результате наземных экспериментов были обнаружены гравитационные волны — колебания пространства-времени, вызванные ускорением массивных объектов. Источником этих гравитационных волн послужило лобовое столкновение двух нейтронных звезд. Волны несли информацию о массах и размерах этих звезд непосредственно перед столкновением, и ученые использовали ее для установления новых ограничений на свойства и возможный состав всех нейтронных звезд.

Подсказки предоставил и космический эксперимент «Исследователь внутреннего состава нейтронной звезды» (*NICER*), который был начат на МКС в июне 2017 г. *NICER* наблюдал пульсары, представляющие собой быстро вращающиеся излучающие нейтронные звезды с мощными магнитными полями. Когда испущенное пульсаром излучение проходит над Землей, мы видим, как пульсары мигают с частотой более 700 раз в секунду. Благодаря этим и другим экспериментам возможность понять, что находится внутри нейтронной звезды, смотрится уже более реалистично. Так, если ученые смогут прояснить этот вопрос, это поможет не только справиться с одним классом «космической странности», но и понять фундаментальные пределы вещества и гравитации.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

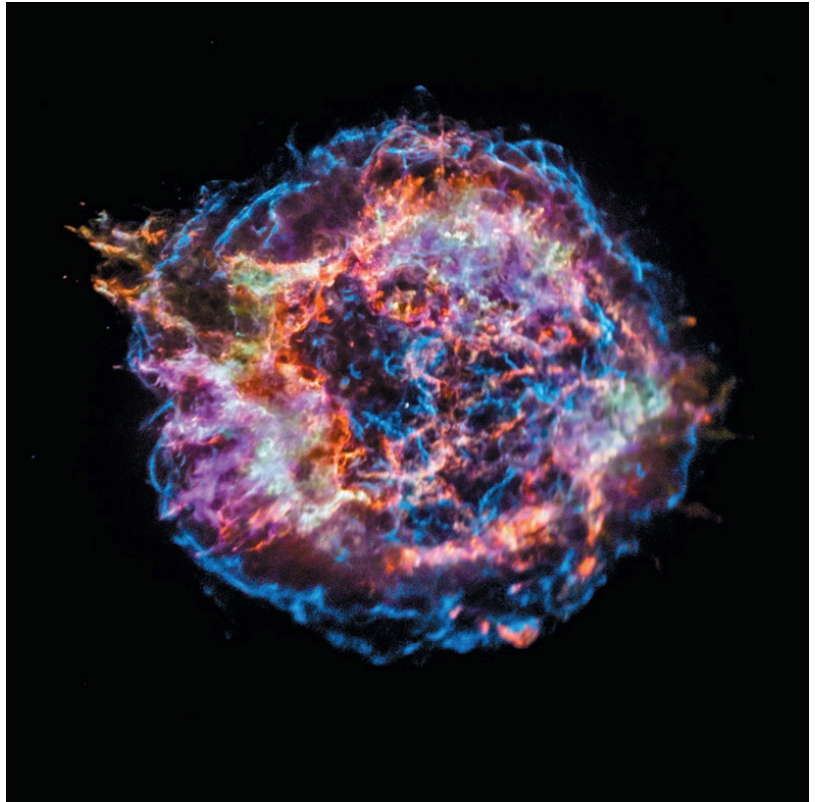
- Нейтронные звезды рождаются, когда звезды в пределах определенного диапазона масс исчерпывают топливо и коллапсируют, оставляя чрезвычайно компактные остатки. Это самая плотная форма материи во Вселенной.
- Ученые знают, что внутри нейтронной звезды гравитация сталкивает протоны и электроны вместе, образуя нейтроны, но они не знают, какие формы принимают эти нейтроны. Соединяются ли они, чтобы создать «сверхтекучую жидкость» без трения, или распадаются дальше на кварки и глюоны, которые их составляют?
- Детекторы, способные измерять гравитационные волны от столкновений нейтронных звезд, и другие новые эксперименты обещают дать представление об этих загадочных объектах.

Сверхтекучие моря

Нейтронные звезды рождаются в катаклизмах, известных как взрывы сверхновых, которые происходят, когда звезды исчерпывают топливо и прекращают генерировать энергию в своих недрах. Внезапно гравитация перестает испытывать сопротивление внутренних сил давления и обрушивается на звезду, подобно поршню, разметав внешние слои звезды и сокрушив ее ядро. Последнее в этот катастрофический момент состоит преимущественно из железа. Гравитация настолько сильна, что буквально раздавливает атомы, впихивая электроны внутрь ядра, до тех пор пока они не сольются с протонами, образовав нейтроны. Физик из Университета Вашингтона в Сент-Луисе Марк Элфорд (Mark Alford) так описывает этот процесс: «Железо сжимается в 100 тыс. раз в каждом направлении. Атом, будучи изначально размером в десятые доли нанометра, становится сгустком нейтронов размером в несколько фемтометров (миллионная часть нанометра, который сам по себе составляет миллиардную часть метра)». Это как если бы Земля сократилась до размера одного городского квартала. Когда звезда завершает сжатие, она содержит около 20 нейтронов на каждый протон. «Это очень похоже на одно гигантское атомное ядро, однако с одним важным отличием, — говорит Джеймс Латтимер (James Lattimer), астроном из Университета Стони-Брук. — Ядро удерживается ядерными взаимодействиями, а нейтронные звезды удерживаются гравитационной силой».

В 1934 г. астрономы Вальтер Бааде (Walter Baade) и Фриц Цвикки (Fritz Zwicky) предложили нейтронные звезды в качестве ответа на вопрос, что может остаться после «сверхновой» — термин, который они использовали в то же время и для сверхъярких взрывов, замечаемых на небе. Тогда минуло всего два года с тех пор, как британский физик Джеймс Чедвик (James Chadwick) открыл нейтрон. Первоначально некоторые ученые скептически относились к тому, что такие экстремальные объекты могут существовать. Эта идея была широко принята, только когда Джоселин Белл Бернелл (Jocelyn Bell Burnell) и ее коллеги наблюдали пульсары в 1967 г. — и исследователи в течение следующего года определили, что они должны быть нейтронными звездами.

Физики считают, что нейтронные звезды могут иметь массу примерно от одной до двух с половиной масс Солнца и что они, вероятно, состоят

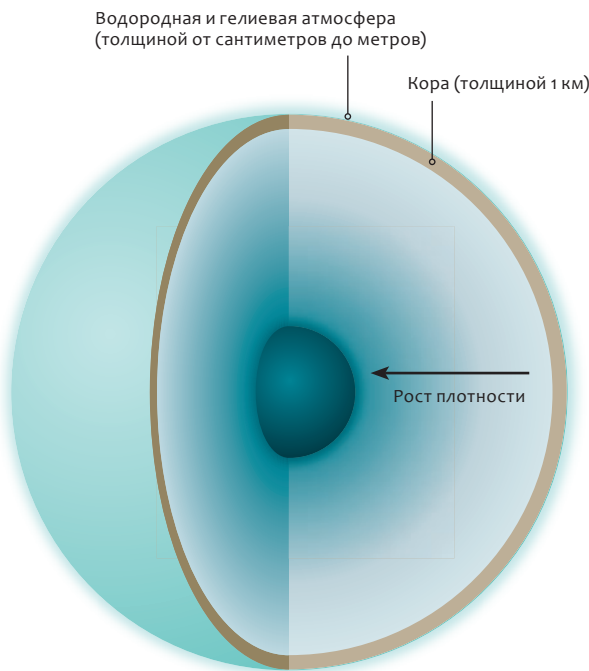


Кассиопея А — остаток древней сверхновой. В ее центре расположена нейтронная звезда, ядро которой может содержать «сверхтекучую жидкость».

по крайней мере из трех слоев. Внешний слой представляет собой газообразную «атмосферу» из водорода и гелия толщиной от нескольких сантиметров до метров. Он плавает над вторым слоем — километровой внешней «корой», состоящей из атомных ядер, расположенных в кристаллической структуре, с электронами и нейтронами между ними. Третий, внутренний слой, который составляет основную часть звезды, представляет собой загадку. Здесь ядра теснятся настолько плотно, насколько позволяют законы ядерной физики, без разделения между ними. По мере продвижения к центру звезды каждое ядро содержит все больше и больше нейтронов. В какой-то момент ядра уже не могут содержать их еще больше — и нейтроны «переливаются через край»: теперь ядер больше нет, а есть только нуклоны (то есть нейтроны или протоны). В конце концов, в самой сердцевине звезды, нуклоны также могут разрушиться. По словам Элфорда, «мы находимся в некоем гипотетическом режиме, когда не знаем, что происходит при этих безумных давлениях и плотностях; мы полагаем, что нейтроны действительно сминаются вместе, и они перекрываются настолько, что вы не можете больше говорить об этом как о жидкости нейтронов, но рассматриваете как жидкость кварков».

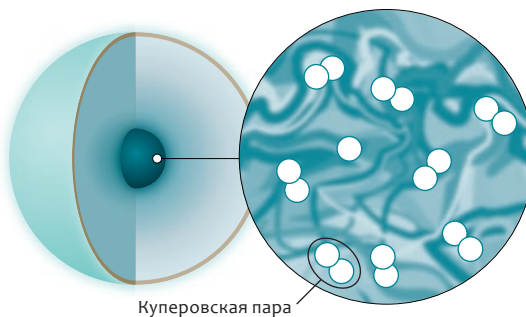
Внутри нейтронной звезды

Нейтронные звезды — загадка. Ученые знают, что над тонким слоем коры, которая состоит из тяжелых атомных ядер и некоторого количества плавающих электронов, у них есть небольшая газовая атмосфера. Но внутри этих внешних слоев лежит ядро — неизвестное вещество, которое, вероятно, в основном состоит из нейтронов. Какую форму принимают эти нейтроны и распадаются ли они на составляющие, кварки и глюоны, внутри самого плотно-го внутреннего ядра звезды — вопрос открытый.



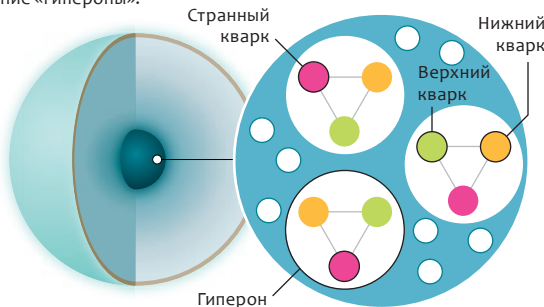
Строение ядра нейтронной звезды (гипотеза I): зародыши сверхтекучей жидкости

Одна из возможностей состоит в том, что частицы внутреннего ядра звезды прижаты друг к другу так тесно, что некоторые из них объединяются, образуя новые частицы, называемые куперовскими парами. Это может случиться с протонами, нейтронами или, если эти частицы уже разрушились, с составляющими их кварками. Новые частицы образуют «сверхтекучую жидкость», которая движется без сопротивления.



Строение ядра нейтронной звезды (гипотеза II): таинственные кварки

Невероятная плотность внутренних областей нейтронной звезды может вынудить кварки преобразовываться из обычных типов (верхнего и нижнего) в экзотические странные кварки. Если такие кварки все еще остаются внутри нейтронов, эти нейтроны получают название «гипероны».



Какую форму принимает эта жидкость — вопрос открытый. Одна из возможностей состоит в том, что кварки образуют «сверхтекучую жидкость», которая не имеет вязкости и, как только она приводится в движение, теоретически никогда не перестанет двигаться. Это странное состояние вещества возможно потому, что кварки чувствуют родство с другими кварками, и если они подходят достаточно близко друг к другу, то могут образовывать связанные состояния, аналог куперовских пар. Сам по себе кварк — это фермион, частица, спин которой имеет квантово-механическое значение в половину целого числа. Когда два кварка объединяются, они действуют уже как единый бозон — частица со спином, равным нулю или какому-то целому числу. После этого изменения частица следует новым правилам. Так, фермионы подчиняются принципу запрета Паули, согласно которому никакие два одинаковых фермиона не могут занимать одно и то же состояние. Бозоны не имеют таких ограничений. Другими словами, будучи фермионами, кварки были вынуждены

тратить более высокие энергии, чтобы «стекаться» друг на друга в переполненных нейтронных звездах. Но став бозонами, кварки получили возможность оставаться в минимально возможном энергетическом состоянии — предпочтительном положении любой частицы — и по-прежнему притискиваться один к другому. При этом кварковые пары образуют сверхтекучую жидкость.

За пределами самой плотной части ядра звезды, где нейтроны, вероятно, не повреждены, нейтроны также могут образовывать пары и приобретают свойства сверхтекучести. На самом деле ученые вполне уверены, что нейтроны проявляют такие свойства в коре нейтронной звезды. Доказательства приходят из наблюдений сбоев вращения пульсаров — ситуаций, при которых вращающаяся нейтронная звезда быстро ускоряется. Теоретики полагают, что эти сбои возникают, когда скорость вращения звезды в целом выходит из синхронизации с вращением сверхтекучего вещества внутри ее коры. Вообще говоря, вращение звезд со временем естественно замедляется,

но сверхтекучее, протекающее без трения, — нет. Когда разница между этими скоростями становится слишком велика, сверхтекучее вещество передает угловой момент коре. По словам Латтимера, «это похоже на землетрясение; вы получаете сбой во вращении и прилив энергии, что ведет к увеличению на короткое время частоты вращения, а затем процесс вращения снова стабилизируется».

В 2011 г. Латтимер и его коллеги предположительно нашли доказательство сверхтекучести в ядре нейтронной звезды. Однако ученый признает, что вопрос все еще открыт для обсуждения. С целью поиска доказательства команда Латтимера, возглавляемая Дэни Пейджем (Dany Page) из Национального автономного университета Мексики, изучила 15-летние рентгеновские наблюдения Кассиопеи А, остатка сверхновой, который впервые стал видимым на Земле в XVII в. Ученые обнаружили, что пульсар в центре туманности охлаждается быстрее, чем предполагает традиционная теория. Одно из объяснений состоит в том, что многие нейтроны внутри звезды образуют пары и становятся сверхтекучими. Пары разрушаются и переформируются, испуская нейтрино, что приводит к потере нейтронной звездой энергии и охлаждению. Как говорит Латтимер: «Это то, что мы никогда не думали увидеть. Но нате вам, все-таки обнаружилась одна звезда подходящего возраста. Однако, как говорится, все проверяется на практике — и доказательство придет еще лет через 50 или около того, когда звезда, по предсказаниям теории, замедлит процесс охлаждения, потому что как только сверхтекучее вещество будет создано, уже не будет нужды терять дополнительную энергию».

Загадочные кварки

Сверхтекучая жидкость — это лишь один из возможных вариантов описания внутренних областей нейтронной звезды. Быть может, нейтронная звезда служит приютом редких «необычных кварков».

Кварки бывают шести видов (ароматов) — верхний (*up*), нижний (*down*), очарованный (*charm*), странный (*strange*), истинный (*truth* или *top*), прелестный (*beauty* или *bottom*). Только два самых легких из них, верхний и нижний, находятся в атомах. Остальные ароматы настолько массивны и нестабильны, что обычно появляются лишь как короткоживущие осколки в процессах столкновения частиц с высокой энергией внутри ускорителей, таких как Большой адронный коллайдер. Но в чрезвычайно плотных недрах нейтронных звезд верхний и нижний кварки внутри нейтронов могут иногда превращаться в странные кварки. (Другие необычные ароматы — очарованный, истинный и прелестный — настолько массивны, что, скорее всего, не сформируются даже там.) Если странные кварки появляются и остаются

связанными с другими кварками, то они образуют нейтроны-мутанты, называемые гиперонами. Возможно также, что эти кварки вообще не содержатся в частицах, — они могут свободно бродить в кварковом супе.

Каждая из этих возможностей должна измеримым образом изменять размер нейтронных звезд. Неповрежденные нейтроны внутри звезды, по словам Арзуманяна, будут действовать, «как марморные шарики, и формировать жесткое, твердое ядро». Твердое ядро, как правило, давит на внешние слои, что ведет к увеличению размера всей звезды. С другой стороны, если бы нейтроны растворились в кварк-глюонном супе, то сформировали бы более «мягкую, легко сдавливаемую» звезду меньших размеров. Один из главных исследователей и научный руководитель эксперимента *NICER* Арзуманян так говорит о целях своего эксперимента: «Одна из ключевых задач *NICER* — произвести измерение массы и радиуса [нейтронных звезд], которое поможет нам выбрать или исключить некоторые теории сверхплотного состояния вещества».

Прибор *NICER* представляет собой коробку размером со стиральную машину. Он установлен снаружи Международной космической станции. *NICER* ведет постоянный мониторинг нескольких десятков пульсаров, распределенных по небу, детектируя испускаемые ими рентгеновские фотоны. Измеряя время прихода и энергию фотонов, а также то, как гравитационные поля звезд искривляют траектории этих фотонов, *NICER* дает возможность вычислять массы и радиусы набора пульсаров и сравнивать их между собой. По словам Элфорда, «если *NICER* обнаруживает звезды с примерно одинаковой массой, но очень разными радиусами, это означает, что происходит что-то странное — присутствует какая-то новая форма материи, которая, появившись, заставляет звезды сжиматься». Такое превращение вещества может произойти, например, когда нейтроны распадаются на кварки и глюоны.

Измерение размеров нейтронных звезд — полезный метод сужения диапазона возможных форм, которые может принимать вещество внутри нейтронных звезд. Ученые когда-то думали, что половина нейтронов в любой нейтронной звезде превратится в гипероны, содержащие странные кварки; теоретические расчеты показали, что такая богатая гиперонами звезда не может превышать массу Солнца в полтора раза. Однако в 2010 г. астрономы во главе с Полом Деморестом (Paul Demorest) из Национальной радиоастрономической обсерватории измерили массу одной нейтронной звезды в 1,97 солнечных масс, исключив ряд теорий о внутренней части нейтронной звезды. По оценкам физиков, гипероны не могут составлять более 10% нейтронной звезды.

Расследования на месте крушения

Изучение отдельных нейтронных звезд может раскрыть нам многое, но мы узнаем гораздо больше, когда исследуем процессы столкновения двух нейтронных звезд друг с другом. В течение многих лет телескопы обнаруживали вспышки света, называемые гамма-всплесками, которые, как подозревали исследователи, происходят от слияния двух нейтронных звезд. В августе 2017 г. были обнаружены гравитационные волны — так астрономы увидели первое подтвержденное слияние нейтронных звезд.

Поговорим об этом событии более подробно: 17 августа 2017 г. два эксперимента — *LIGO* (Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория, базируется в штатах Вашингтон и Луизиана), и *Virgo* (европейский проект недалеко от Пизы) — одновременно обнаружили гравитационные волны, вызванные тем, что две нейтронные звезды, сближаясь друг с другом по спирали, в конце концов слились в единую нейтронную звезду или черную дыру. Это было не первое обнаружение гравитационных волн, но все предыдущие сигналы порождались столкновениями двух черных дыр. До этой даты ученые никогда не наблюдали гравитационных волн, исходящих от нейтронных звезд, и это был также первый раз, когда телескопы отреагировали на обнаружение гравитационных волн и увидели свет, исходящий из той же самой области на небе и в то же самое время. Электромагнитные и гравитационные волны совместно дали большое количество информации о том, где и как произошел катаклизм, обогативший наши знания физики нейтронных звезд. Вот как сказал Латимер об этом удачно выпавшем на долю астрономов наблюдении: «Я был совершенно ошеломлен. Думал, что это слишком хорошо, чтобы оказаться правдой».

Астрофизики проследили волны от пары нейтронных звезд, находящихся на расстоянии около 130 млн световых лет от Земли. Детали этих волн — их частота, интенсивность и путь, которому они следовали с течением времени, — позволили исследователям оценить, что непосредственно перед слиянием каждая из нейтронных звезд обладала массой примерно в 1,4 солнечных и радиусом порядка 11 или 12 км. Эти знания помогут ученым составить детальное описание физики процессов нейтронных звезд — их уравнение состояния. Последнее дает соотношение для плотности вещества при разных давлениях и температурах и должно быть применимо ко всем нейтронным звездам во Вселенной. Теоретики предложили несколько возможных выражений для уравнения состояния, которые соответствовали бы разным конфигурациям вещества внутри нейтронных звезд. Кроме того, предложили и новые наблюдения, чтобы иметь возможность исключить некоторые

из теоретических моделей. Например, открытие того факта, что радиусы нейтронных звезд относительно малы, стало неожиданностью. Некоторые теории сталкиваются с трудностями, когда пытаются дать единое описание и этих компактных нейтронных звезд, и известных тяжелых звезд, исполнинов с массами в 1,97 солнечных. Все эти звезды невозможно описать одним фундаментальным уравнением состояния. По словам Джоселин Рид (Jocelyn Read), астрофизика Калифорнийского государственного университета в Фуллертоне и соруководителя команды *LIGO* по исследованию экстремальных состояний вещества, «это заставляет наше уравнение состояния прокладывать себе путь через всевозможные наблюдения; попытка создать модели компактных звезд, а также моделей, в которых поддерживается существование массивных звезд, становится сложной задачей для теоретиков, но это действительно интересно — и может стать еще интереснее».

До сих пор в экспериментах *LIGO* и *Virgo* наблюдалось только одно столкновение нейтронных звезд, но скоро может осуществиться еще одно подобное наблюдение. «Я работаю в этой области достаточно долго, — говорит Рид, — и это такая фантастика — продвинуться из эпохи чисто теоретических рассуждений наподобие: "Если мы в принципе можем увидеть гравитационные волны, тогда мы должны быть в состоянии их увидеть". Теперь у нас появился шанс сделать это».

Пределы вещества

Тем временем, пока гравитационно-волновые детекторы улучшают свою чувствительность, выигрыш может быть очень велик.

Например, одна из проверок того, что находится внутри нейтронной звезды, включает поиск гравитационных волн, испускаемых любой закрученной жидкостью в ее середине. Если жидкость имеет очень низкую вязкость или вообще не имеет вязкости, как сверхтекучая жидкость, то она может начать течь по определенным путям, называемым *г*-модами, которые высвобождают гравитационные волны. Как говорит Элфорд, «эти гравитационные волны будут намного слабее, чем от слияния; здесь мы имеем дело с веществом, которое тихо плещется, а не разрывается на части». Элфорд и его сотрудники определили, что запущенный в настоящее время усовершенствованный детектор *LIGO* не сможет регистрировать такие слабые волны. Но их будут способны уловить будущие обновления *LIGO*, а также новые запланированные обсерватории, такие как европейский наземный Телескоп Эйнштейна.

Разрушение нейтронных звезд дало бы нам картину материи в ее едва постижимых крайностях — форму, настолько удаленную от атомов, составляющих наш мир, что она выходит за пределы

возможного. Могли бы воплотиться в реальность воображаемые курьезы, такие как плещущаяся кварковая материя, сверхтекучие нейтроны и ди-ковинные гиперонные звезды. Глубокое понимание физических процессов, идущих в нейтронных звездах, смогло бы дать ученым и нечто большее. Фундаментальная задача — это понимание законов, которые управляют ядерными взаимодействиями: нейтронные звезды смогли бы помочь разобраться в причудливом танце протонов, нейтронов, кварков и глюонов. И, наконец, нейтронные звезды смогли бы привести ученых к разгадке самой большой тайны природы — гравитации.

Нейтронные звезды — это всего лишь один из способов исследования ядерных сил. Работа ведется по всему миру и на ускорителях частиц, которые действуют как микроскопы, чтобы заглянуть внутрь атомных ядер. Когда же проблемы ядерной физики будут решены, ученые смогут переключиться на гравитацию. «Нейтронные звезды — это смесь гравитационной физики и ядерной физики, — говорит Ор Хен (Or Hen), физик из Массачусетского технологического института. — Сейчас мы используем нейтронные звезды как лабораторию для понимания ядерной физики. Но поскольку у нас есть доступ к ядрам здесь, на Земле,

мы должны быть в состоянии достаточно хорошо ограничить ядерный аспект проблемы. Тогда мы сможем использовать нейтронные звезды, чтобы понять гравитацию — одну из самых больших проблем в физике».

Гравитация в ее нынешнем понимании — через общую теорию относительности Эйнштейна — не уживается с теорией квантовой механики. В конечном счете одна из теорий с необходимостью должна сдвинуться с места, и физики не знают, какая именно. «Мы туда доберемся, — уверен Хен, — и это очень интересная перспектива». ■

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Финкбайнер Э. Вестники с небес // ВМН, № 7, 2018.
- Rapid Cooling of the Neutron Star in Cassiopeia A Triggered by Neutron Superfluidity in Dense Matter. Dany Page et al. in Physical Review Letters, Vol. 106, Article No. 081101; February 22, 2011.
- GW170817: Measurements of Neutron Star Radii and Equation of State. B.P. Abbott et al. (The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration) in Physical Review Letters, Vol. 121, Article No. 161101; October 15, 2018.

Выходит 6 раз в год

Познавательный журнал для хороших людей

Черные дыры – это результат конечной стадии эволюции массивных звезд, взрывающихся в результате гравитационного коллапса, и тихой «кончины» звезд-супертяжеловесов

Палеогенетик С. Паабо: «Может быть, полные скелетные останки денисовца давно уже где-нибудь найдены, только их пока не опознали»

Полугодовая осада и разгром корякского острога Большой посад – один из самых кровавых эпизодов освоения русскими Камчатки

Уже в неолите на востоке Китая для массового производства изделий из нефрита использовали сверлильно-расточный «станок» с каменным подшипником

«Кому нужны книжки без картинок?» – правоту Алисы полностью подтвердила уникальная выставка дореволюционной детской книги в главной библиотеке страны

www.scfh.ru