НОВОРОЖДЕННЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Вот уже более 30 лет нейтронные звезды не сходят с астрофизической сцены, играя одну из ведущих ролей в современной астрофизике. Однако, до сих пор наблюдается лишь малая их часть, и остается неясным какими же нейтронные звезды рождаются.

1 Введение

Нейтронные звезды были предсказаны в 30-е годы нашего века и открыты в 1967 году как радиопульсары – периодические источники радиоимпульсов. В течение долгого времени было привычным считать, что радиопульсары это самые типичные молодые нейтронные звезды, т.е. что все они проходят через стадию радиопульсара. Исходя из этого и рассуждали о начальных параметрах нейтронных звезд, т.е. основных их свойствах сразу после рождения. Здесь мы будем считать моментом рождения не взрыв сверхновой, а немного более позднюю стадию, когда горячая "протонейтронная звезда", остыв и уменьшившись в размерах в 2-3 раза, переходит в "долгоживущее" состояние обычной нейтронной звезды.

Основные параметры наблюдаемых радиопульсаров можно увидеть на рисунках 1-3. Периоды лежат в основном в диапазоне 0.1–1 секунды. Пульсары с самыми короткими периодами (менее 30 миллисекунд), т.н. миллисекундные пульсары, оказываются не самыми молодыми, а самыми старыми и происходят из двойных систем, где аккреция раскручивает уже немолодые нейтронные звезды. У этих пульсаров самые слабые магнитные поля. У обычных же радиопульсаров поля порядка 10^{12} Гс.

Из разнообразных параметров нейтронных звезд наибольший интерес представляют их начальные периоды вращения, p (радиопульсар в течении своей жизни замедляет вращение), начальное магнитное поле, B, начальная скорость, v (нейтронная звезда может приобрести огромную скорость вплоть до тысяч км/с за счет взрыва сверхновой и распада двойной, если взорвалась звезда, входившая в двойную систему), начальная масса, М, и состояние вещества внутри звезды, т.е. т.н. уравнение состояния. Мы в основном поговорим о первых трех из этих параметров.

Почему же эти параметры представляют такой интерес? Дело здесь не только в самостоятельном интересе данной проблемы, связанном со сложными процессами, предшествующими образованию нейтронной звезды. Поскольку нейтронные звезды связаны со многими интересными астрофизическими объектами такими как, например, двойные рентгеновские источники, то для расчета эволюции последних необходимо знать начальные параметры нейтронных звезд. Например, если вы хотите рассчитать количество рентгеновских пульсаров в нашей Галактике (о подобных расчетах см., например, статьи В.М. Липунова в журнале "Звездочет" и Соросовском образовательном журнале N6, 1998 и статью автора в журнале "Земля и Вселенная" N5, 1995, стр. 17-24), то для этого вам нужно знать с какими периодами и особенно с какими магнитными полями и скоростями рождаются нейтронные звезды, входящие в данные системы.

Прежде чем переходить к обсуждению начальных параметров давайте рассмотрим каналы рождения нейтронных звезд, т.к. история, предшествовавшая взрыву сверхновой (см. рис. 4), наследственность нейтронной звезды, может оказывать влияние на всю ее последующую жизнь.

2 Как рождаются нейтронные звезды

Как известно, белые карлики не могут иметь массу больше некоторой предельной, называемой чандрасекхаровским пределом в честь знаменитого индийского астрофизика Субраманьяна Чандрасекхара (1910-1995), получившего в 1983 году за свои выдающиеся работы в области релятивистской астрофизики нобелевскую премию по физике. Предельная масса вычисляется по следующей формуле:

$$M_{Ch} = 5.83 \cdot \mu_e^{-2} \cdot M_{\odot},$$

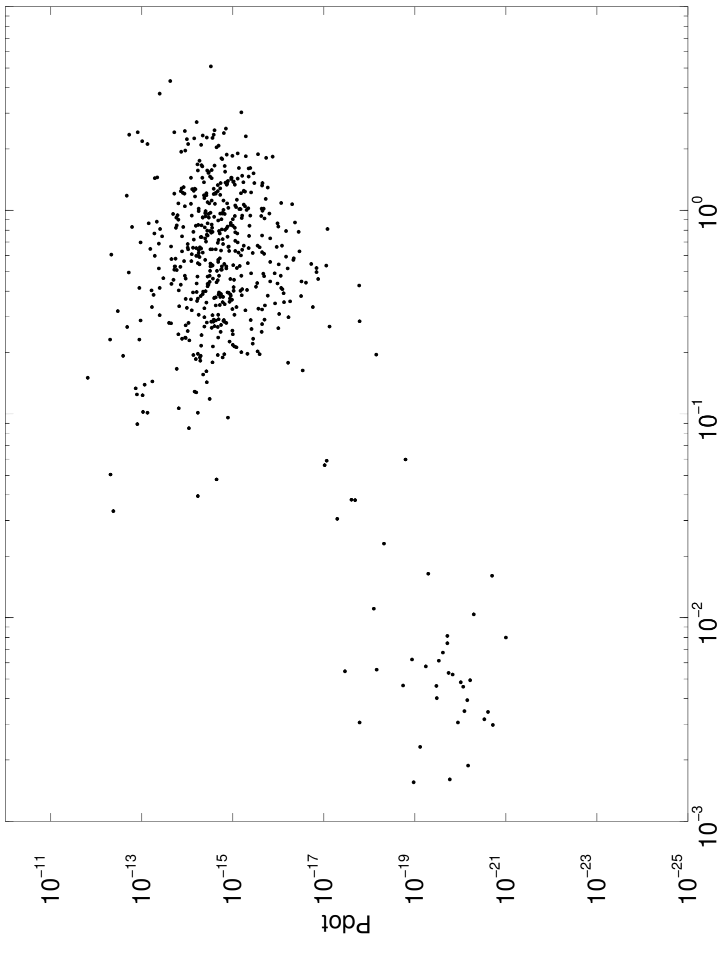

Figure 1: По горизонтальной оси отложены периоды радиопульсаров, P. По вертикальной оси — производные периодов, Pdot. В левой нижней части рисунка сгруппировались миллисекундные пульсары. По производной периода определяют магнитное поле пульсара.

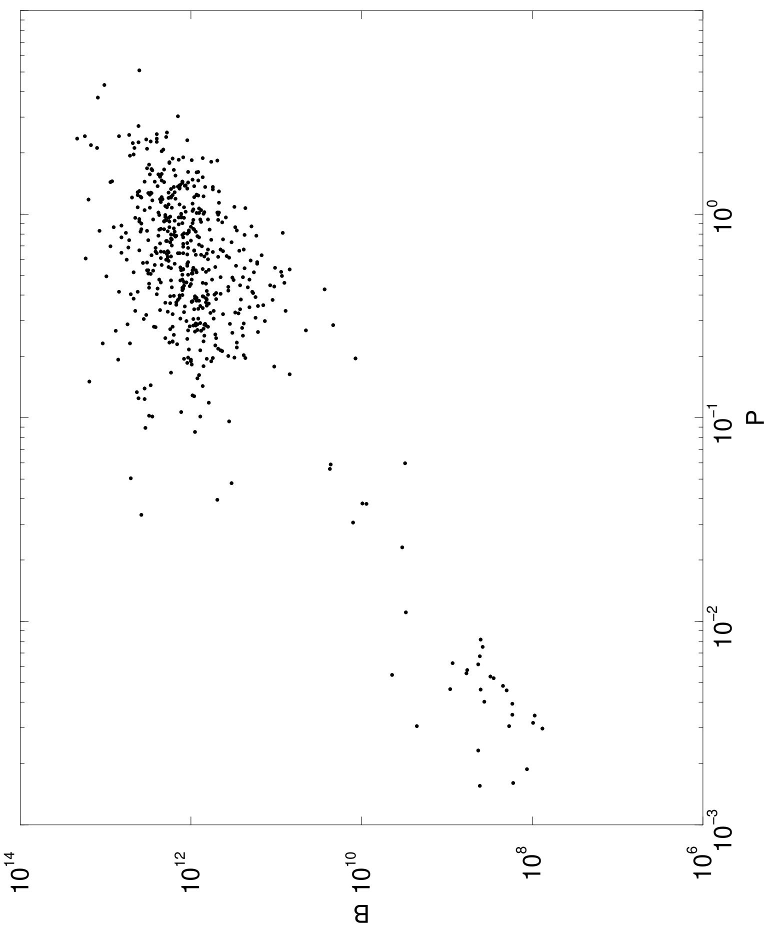

Figure 2: График период – магнитное поле. Магнитные поля определены по темпу замедления вращения радиопульсаров в предположении магнито-дипольного излучения.

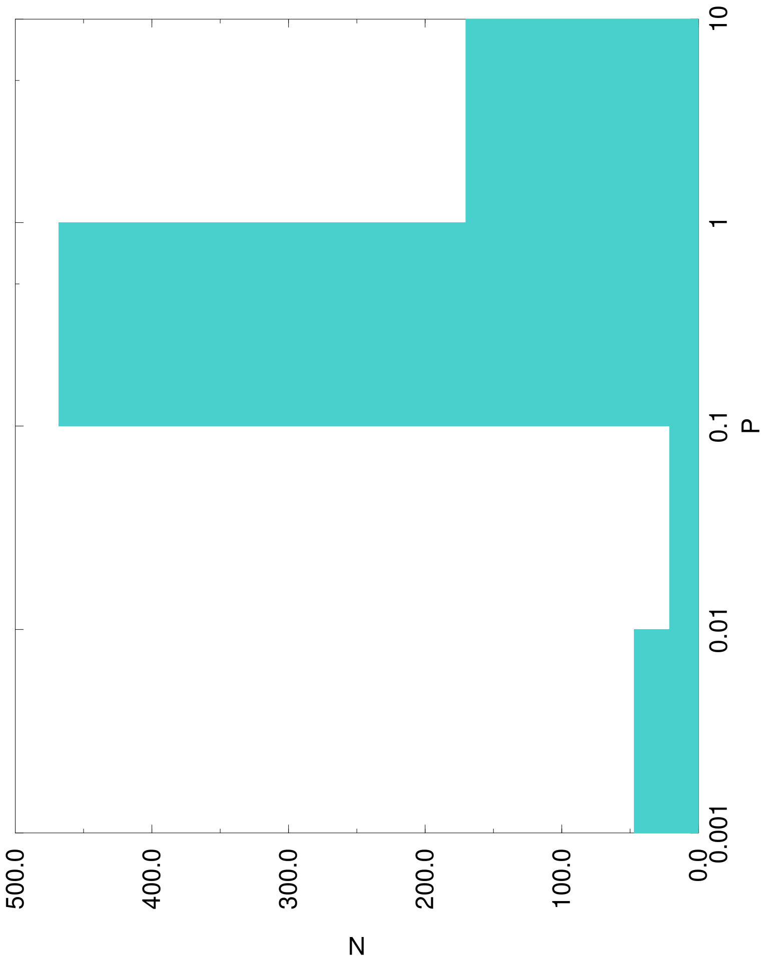

Figure 3: Гистограмма распределения пульсаров по периодам. Гистограмма построена для четырех интервалов периодов: от 0.001 секунды до 0.01, от 0.01 до 0.1, от 0.1 до 1 и от 1 до 10 секунд. По вертикальной оси отложено количество пульсаров в каждом из интервалов

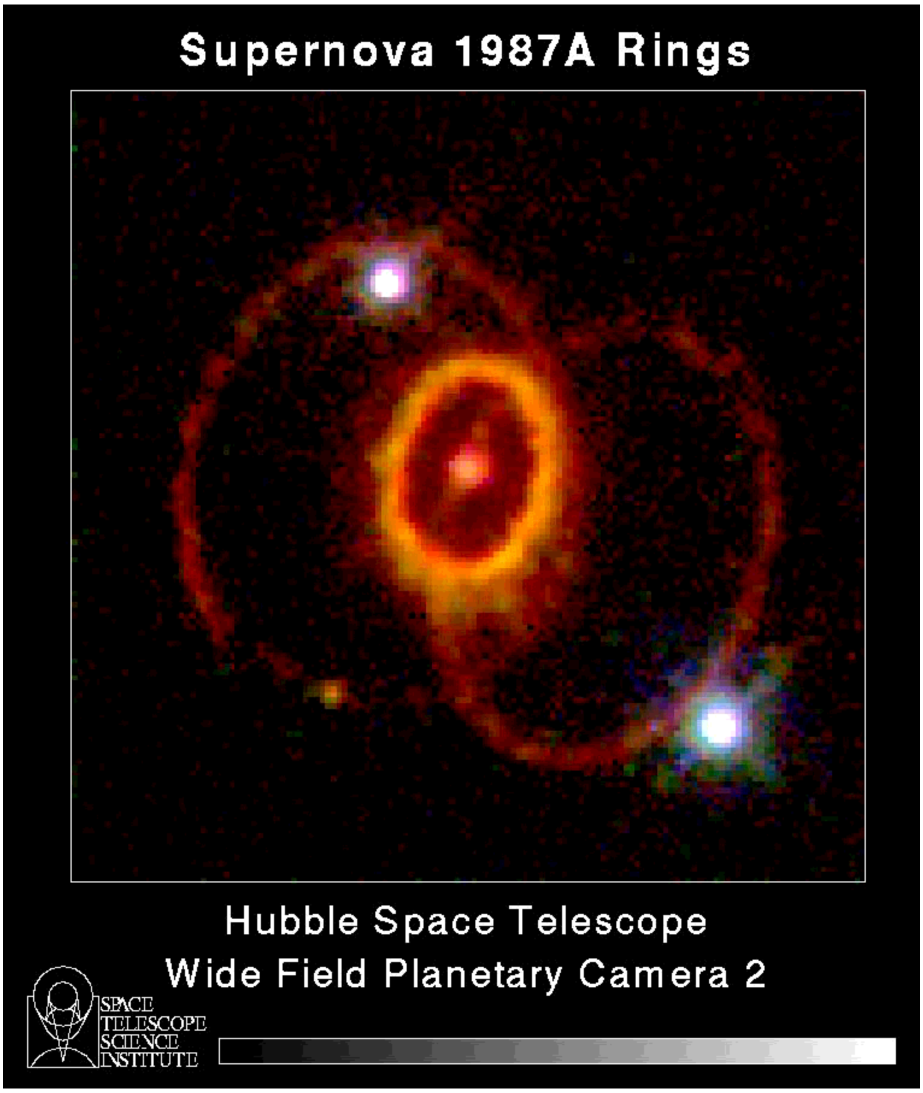

Figure 4: Вспышка сверхновой 1987A в Большом Магеллановом облаке.

где μ_e^{-2} – молекулярная масса, приходящаяся на один электрон.

Как видно, предел зависит от химического состава белого карлика, и для реальных параметров тяжелых карликов составляет около 1.4 массы солнца. При большей массе объект становится нейтронной звездой. Таким образом, мы сразу приходим к мысли, что если нам удастся постепенно увеличивать массу белого карлика, то он превратится в нейтронную звезду. Это событие будет сопровождаться взрывом свехновой типа Ia. Единственный способ увеличить массу белого карлика – это аккреция. Белый карлик может захватывать вещество прямо из межзвездной среды. Падая на него вещество будет разогревать поверхность белого карлика, т.к. будет выделяться потенциальная энергия, что не даст карлику остыть. Но темп аккреции из межзвездной среды очень низкий, не более 10^{10} г/с, что позволило бы набрать массу солнца лишь примерно за 10^{16} лет, а даже хабберовское время на 6 порядков меньше. Поэтому единственный способ заставить белый карлик “поправиться“, это аккреция в тесной двойной системе (о тесных двойных системах см., например, статью автора в журнале ”Звездочет” N12, 1995, стр. 12-14).

Если второй компонент системы заполняет свою полость Роша, то поток вещества устремляется на белый карлик, и его масса может существенно увеличиться всего, скажем, за миллион лет. Когда масса достигнет чандрасекхаровского предела, произойдет переход белого карлика в нейтронную звезду.

Это один из возможных каналов образования нейтронных звезд. Многие системы могут возникать только благодаря такому процессу. Нейтронные звезды, образующиеся при этом могут отличаться от тех, которые образуются через более известный канал – взрыв массивной звезды.

Известно, что тяжелые звезды в процессе своей эволюции, пережигая все более тяжелые элементы, подходят к моменту потери устойчивости. И происходит фантастический по своей мощности взрыв – вспышка сверхновой. Выделяется (в основном в виде нейтрино) энергия порядка 10^{53} эрг. В итоге может образоваться нейтронная звезда или черная дыра (так же может образоваться т.н. “кварковая“ или “странная“ звезда, если такие объекты действительно существуют в природе, а не только в статьях теоретиков, или же после взрыва может вообще не остаться никакого компактного остатка). Пока точно неизвестно из каких звезд образуются нейтронные звезды, а из каких черные дыры. Но хорошей оценкой является следующее условие: если масса звезды на главной последовательности лежала в интервале от 10 до 40 солнечных масс, то образуется нейтронная звезда, а если масса была больше – то черная дыра. Скорее всего реальность окажется немного сложнее, и в одном и том же интервале масс будут возможны оба варианта.

Таким образом нейтронная звезда может образоваться или из белого карлика в двойной системе, или из массивной звезды. Добавим, что и массивная звезда может входить в тесную двойную систему. Неизвестно, оказывает ли это решающее воздействие на параметры рождающейся нейтронной звезды. Но это не исключено. Причем здесь возможно два варианта: может взрываться изначально более массивная компонента двойной, часть вещества которой перетекла на соседку. И может взрываться соседка, на которую натекло вещество.

Итак, мы рассмотрели возможные варианты образования нейтронных звезд. Что же при этом получается?

3 Зачем нужны разные нейтронные звезды?

Так или иначе образовавшаяся нетронная звезда начинает жить, эволюционировать. Изменяется ее период (он может и уменьшаться, и увеличиваться), изменяется магнитное поле. При этом звезда проходит различные стадии, проявляя себя как тот или иной астрофизический объект. Если бы мы знали, какими нейтронные звезды рождаются, то могли бы предсказать, какие объекты из них получатся в будущем. Но реально все выглядит по-другому. Открываются какие-то астрономические источники, и для их объяснение приходится придумывать эволюцию и начальные параметры

Figure 5: Крабовидная туманность, в которой находится самый знаменитый радиопульсар.

нейтронных звезд. Для этого и нужны разные нейтронные звезды.

Напомним читателям, что астрономия принципиально отличается от других естественных наук тем, что не может проводить эксперименты с объектами своих исследований. Звезду нельзя запихнуть в пробирку! Астрономы могут только "подсматривать" за природой. Это делает астрономию более интересной, но доставляет также и множество трудностей. При этом многое приходится домысливать, что порождает как правило несколько сценариев объяснения одного и того же явления.

Для нашей истории это важно вот почему. Мы конечно же наблюдаем те нейтронные звезды, которые легче всего увидеть. И даже здесь можно придумывать разные варианты. Но видим мы лишь малую (около 1/1000000) часть нейтронных звезд: около 100 из $10^8 --- 10^9$ в Галактике. И объяснять невидимые объекты можно самыми разнообразными способами. А как раз начальные параметры в основном и будут определять наблюдательные проявления нейтронных звезд.

Чтобы рассмотреть различные идеи о начальных параметрах, поговорим, например, о "ненаблюдаемых" нейтронных звездах в остатках сверхновых. Естественно предположить, что в подавляющем большинстве остатков должны наблюдаться радиопульсары, поскольку звезд в "нейтроннообразующем интервале масс" примерно в 10 раз больше, чем звезд в "чернодырнообразующем интервале". Однако, из примерно 200 остатков только около 30 имеют вблизи себя пульсары. Причем, как показали многочисленные исследования, большая часть таких ассоциаций должна быть просто случайным совпадением. И лишь около 7 пар пульсар– остаток сверхновой реальны. Рассмотрим вначале самые естественные объяснения этого факта.

Во-первых, пучок излучения пульсара может просто проскальзывать мимо наблюдателей. т.е. мимо Земли. Действительно, мы можем видеть лишь около трети пульсаров из-за этого эффекта. Во-вторых, за счет больших скоростей (а скорости пульсаров порядка сотен км/с) нейтронные звезды могут успеть убежать далеко от остатка породившей их сверхновой. Но эти два явления, которые безусловно существуют, не могут объяснить более чем

20-кратного дефицита пульсаров. Требуется предположение о том, что не все нейтронные звезды в своей молодости оказываются пульсарами, или что эта стадия у некоторых из них оказывается чрезвычайно короткой (самые старые остатки сверхновых имеют возраст порядка $10^5 - -10^6$ лет).

Это можно сделать тремя способами:

1. Большие начальные периоды (больше 2 секунд).

2. Маленькие начальные магнитные поля (меньше 10^8 Гс).

3. Очень большие начальные магнитные поля (больше 10^{14} Гс).

Первая гипотеза, в частности, связывается со следующей интересной идеей, выдвинутой Спруитом и Финней. Поскольку для объяснения больших скоростей пульсаров требуется асимметричный взрыв сверхновой (заметим, однако, что этот факт оспаривается, хотя и является сейчас общепринятым), то разумно предположить, что действие его на нейтронную звезду будет не симметричным, и тогда взрыв "подкрутит" нейтронную звезду. Стало быть, короткопериодические нейтронные звезды будут иметь большие скорости и наблюдаться как радиопульсары, а долгопериодические будут иметь маленькие скорости (что хорошо для эволюции двойных) и не будут давать радиоимпульсов, поскольку причина у больших скоростей и коротких периодов одна и та же.

Вторая гипотеза (которую частично разделяет и автор данной статьи) имеет то преимущество, что не требует дополнительной гипотезы о распаде магнитного поля нейтронной звезды для объяснения маленьких магнитных полей рентгеновских барстеров и некоторых рентгеновских источников, демонстрирующих квазипериодические осцилляции. Кроме этого, гипотеза легко объясняет тот факт, что спутник ROSAT не наблюдает большого числа одиночных аккрецирующих нейтронных звезд (об этих объектах см. статьи автора в журналах "Земля и Вселенная" N3, 1994, стр. 22 и "Звездочет" N7, 1996, стр. 15-17 и N4, 1996, стр. 6-7). Радиопульсар не возникает из-за слишком слабого магнитного поля (звезда оказалась бы в правой нижней части рисунка 1 или 2, где нет пульсаров).

Третья гипотеза была предложена Томпсоном и Дунканом для объяснения источников повторяющихся гамма-всплесков (о гамма-всплесках см. статью В.М. Липунова в Соросовском образовательном журнале N5, 1998). Теперь она также применяется к одиночным нейтронным звездам с большими периодами. Примером такого источника является объект RX J0720.4-3125 с периодом 8.39 секунды. Альтернативой объяснения свойств этого объекта, предложенной Денисом Коненковым и автором данной статьи (и чуть позже независимо Вангом в США), является как раз затухание магнитного поля нейтронной звезды в процессе ее эволюции. Наблюдения рентгеновских пульсаров подтверждают, что нейтронные звезды могут иметь большие магнитные поля, более 10^{13} Гс. Темп замедления нейтронных звезд в этих двойных системах показывает, что они обладают мощными магнитосферами. В рамках этой гипотезы пульсар может возникнуть, но очень быстро замедлится из-за больших потерь на излучение. Косвенно данную гипотезу поддерживают открытия компактных рентгеновских источников в остатках сверхновых, хотя иногда эти источники могут быть связаны не с молодыми, а со старыми нейтронными звездами, как это видимо происходит в остатке сверхновой RCW103.

Как видно, каждая из гипотез объясняет сразу несколько явлений, и выбор между ними чрезвычайно затруднителен. В идеале необходимо каким-то образом получить непосредственную информацию о свойствах нейтронных звезд сразу после рождения. Сделать это можно, по всей видимости, только с помощью детекторов гравитационных волн, которые донесут до нас первый крик новорожденной нейтронной звезды.

4 Далеко ли падает яблоко от яблони или поиски черной кошки в темной комнате

Итак, пока мы не слышали первых криков нейтронных звезд: у нас нет детекторов гравитационных волн, мы не видим радиопульсаров в самых молодых остатках сверхновых (тех, которые моложе Крабовидной туманности (рис. 5), например галактические сверхновые 1181 г., 1572 г., 1604 г., 1658 г., сверхновая в Большом Магеллановом облаке 1987A). Значит, нам остается восстанавливать параметры новорожденных нейтронных звезд по наблюдениям уже заметно постаревших объектов. Но это совсем не просто, т.к. параметры могут изменяться со временем, или звезды могут прятаться от нас, практически не излучая.

Пока решить эту проблему не удалось. Нейтронные звезды рождаются очень разными, а видим мы лишь самые заметные. Многообразие идей показывает, что до окончательного ответа еще далеко.

канд физ-мат наук Сергей Б. Попов

мл. науч. сотр. ГАИШ МГУ