

вклад в массу. Это сильно снижает анизотропию в выделении энергии. С другой стороны, важную роль может сыграть несимметричный поджог вещества внутри белого карлика из-за искажения его формы. Короче говоря, вопрос о возможном значении анизотропии остается открытым.

## § 9. Эжектирующие звезды в двойных системах

Напомним, что к 1985 г. наблюдалось всего четыре радиопульсара, входящих в двойные системы. Во всех четырех случаях вторая звезда не наблюдается ни в одном из электромагнитных диапазонов. По-видимому, это связано с тем, что невидимые компоненты являются старыми, проэволюционировавшими звездами (вырожденные карлики, нейтронные звезды, черные дыры).

**Радиопульсары в паре с вырожденными звездами.** Сразу после открытия первого радиопульсара в двойной системе, PSR 1913 + 16 (Хальс и Тейлор, 1975а, б), стало ясно, что такая двойная система является идеальной "лабораторией" для исследования релятивистских эффектов (Брумберг и др., 1975). Благодаря высокой стабильности периода радиоимпульсов удалось наблюдать следующие эффекты: 1) классический эффект Доплера; 2) поперечный эффект Доплера; 3) вращение линии апсид; 4) гравитационное красное смещение; 5) изменение периода двойной системы, которое оказалось в полном согласии с предсказаниями общей теории относительности Эйнштейна. Измерение этих эффектов позволило с рекордной степенью точности определить массы звезд. Согласно последним данным (Тейлор и др., 1982) масса радиопульсара равна  $M_x = (1,41 \pm 0,06)M_\odot$  и масса второй звезды  $M = (1,41 \pm 0,06)M_\odot$ . Характерное время замедления составляет  $2 \cdot 10^8$  лет. Отсюда находим оценку дипольного момента  $\mu \approx 10^{28}$  Э · см<sup>3</sup>, а напряженность поля  $B \approx 10^{10}$  Э.

Важнейший вопрос состоит в том, почему двойная система пульсара PSR 1913 + 16 не распалась при образовании нейтронной звезды? Сценарий эволюции двойной системы, отвечающий на этот и другие вопросы, был дан Срнивасаном и Ван ден Хёвелом (1982). Более подробно такого рода сценарии рассмотрены в последней главе. Здесь мы лишь остановимся на одном моменте.

В сценарии предполагается, что радиопульсар PSR 1913 + 16 – это бывший рентгеновский пульсар, причем наблюдаемый сейчас период вращения нейтронной звезды близок к периоду, установившемуся во время аккреции. Напомним, что равновесный период А-пульсара в случае дисковой аккреции равен (формула (80.V))

$$p \approx 1 \mu_{30}^{6/7} L_3^{-3/7} \text{ с.} \quad (61.VII)$$

Полагая  $L_x = 10^{38}$  эрг/с, что близко к эддингтоновскому пределу, получим  $p \approx 0,059$ ,  $\mu_{30} \approx 10^{-2}$ . Эти значения неплохо согласуются с оценками по магнитодипольной формуле. Отметим, однако, что на самом деле темп аккреции может существенно превышать критическое значение, соответствующее эддингтоновскому пределу. В этом случае равновесный период оказывается несколько иным (см. следующую главу).

**Почему нет радиопульсаров в паре с нормальными звездами?** Уже в первые годы после открытия радиопульсаров стало ясно, что они по какой-

то причине избегают двойных систем. Для объяснения столь странной несовместимости были предложены три гипотезы.

1. Двойные системы распадаются после первого взрыва, сопровождающегося образованием нейтронной звезды. Поскольку было ясно, что из-за обмена массой сначала взрывается менее массивный компонент, двойная система заведомо не может потерять больше половины всей массы. Следовательно, распад должен быть связан с анизотропией коллапса (Шкловский, 1980).

2. Шварцман (1971а) интерпретировал отсутствие радиопульсаров с совершенно иных позиций. Нейтронные звезды остаются в двойных системах, но из-за присутствия аккреционных потоков стадия радиопульсара оказывается гораздо короче, чем у одиночной звезды. Поэтому вероятность найти радиопульсар в двойной системе гораздо ниже.

3. Илларионов и Сюняев (1975) обратили внимание на то, что когерентное радиоизлучение с длиной волны более 75 см, благодаря которому и наблюдается подавляющая часть радиопульсаров, эффективно поглощается в звездном ветре нормальной звезды.

Предположим, что нормальная звезда теряет вещество сферически-симметрично. Тогда оптическая толща, обусловленная свободно-свободным поглощением в звездном ветре, оценивается выражением

$$\tau_{br} \approx 3,2 \cdot 10^8 T_4^{-3/2} \dot{M}_{-8}^2 a^{-3} v_8^{-2} \lambda_{75}^2, \quad (62.VII)$$

где  $T_4 = T_w/10^4$  К – температура звездного ветра,  $\lambda_{75} = \lambda/75$  см – длина волны радиоизлучения,  $a$  – большая полуось орбиты, выраженная в радиусах Солнца. В массивных двойных системах с  $\dot{M}_{-8} \approx 100$ ,  $v_8 \approx T_4 \approx 1$ . Следовательно, звездный ветер непрозрачен даже для очень широких систем ( $a \lesssim 10^3$ ).

Какой же из трех предложенных механизмов объясняет отсутствие радиопульсаров в двойных системах с нормальными звездами? Для корректного ответа на этот вопрос необходим детальный анализ эволюции нормальных и нейтронных звезд в двойных системах (см. гл. X). Проведенное моделирование такой эволюции показало, что все три фактора дают существенный вклад в явление избегания радиопульсарами двойных систем (Корнилов и Липунов, 1984). Подробнее это рассматривается в последней главе.

Чтобы понять, как остро стоит вопрос, например, с анизотропией, приведем следующую оценку. Известно, что даже массивные звезды, находясь на главной последовательности, теряют вещество со скоростью  $\dot{M}_0 \lesssim 10^{-8} M_\odot/\text{год}$ . Образование молодого радиопульсара вероятнее всего именно в тот момент, когда нормальная звезда – соседка находится на главной последовательности (ведь это самое продолжительное состояние нормальной звезды). Легко видеть из формулы (62.VII), что при  $v_8 \approx 2 - 3$  звездный ветер становится прозрачным для систем с  $a \gtrsim 10^{2,5} - 10^3$ , г.е. с периодами в годы и десятки лет. Такие широкие пары с нейтронными звездами действительно наблюдаются: например, A 0535 + 26 или X Per (период  $\sim 500$  дней). В столь широких системах вещество звездного ветра вблизи нейтронной звезды крайне разрежено, так что фаза эжектирующего пульсара может длиться достаточно долго. Количество таких широких пар очень велико – согласно статистическим исследованиям число таких систем превосходит число тесных двойных систем. Мы приходим к неизбежному

выводу — радиопульсары должны быть видны в паре с нормальными звездами. А их нет! Это можно было бы понять, если предположить умеренную анизотропию, которой достаточно для распада широких двойных систем после первого взрыва. Для объяснения отсутствия радиопульсара в паре с нормальными звездами нужно предположить (Корнилов и Липунов, 1984), что в среднем при образовании нейтронная звезда получает скорость отдачи  $\sim 80 - 100$  км/с. С другой стороны, эти расчеты показали, что  $\sim 0,1\%$  радиопульсаров должны все же входить в системы с нормальными звездами и при этом быть видны как радиопульсары. Поэтому можно надеяться, что в недалеком будущем такие пульсары будут открыты. Это имело бы не только фундаментальное значение для подтверждения теории эволюции нейтронных звезд, но и было бы крайне важно для понимания процессов, происходящих в звездном ветре нормальных звезд. Ведь радиопульсар, обращающийся в полупрозрачном звездном ветре нормальной звезды, подобен своеобразному зонду, просвечивающему импульсным излучением неоднородную плазму (Липунов и Прохоров, 1984). В последней работе были рассчитаны три периодических эффекта, которые могли бы наблюдаться у радиопульсаров в двойных системах: 1) поглощение радиоизлучения (кривая блеска); 2) изменение момента прихода импульсов (кривая меры дисперсии); 3) фарадеевское вращение плоскости поляризации в магнитном поле звездного ветра.

В проведенных расчетах не учитывалась рефракция радиоволн. Его можно пренебречь в большинстве случаев. Если же роль рефракции оказывается важной, это приводит к новым интересным деталям на кривой блеска радиопульсара (Липунов и Прохоров, 1986).

**Эффект "отражения".** На первый взгляд кажется, что двойная система — не лучшее место, где могла бы проявить себя эжектирующая нейтронная звезда: плотный звездный ветер поглощает когерентное радиоизлучение, он же уменьшает время жизни звезды на стадии эжекции. Да, это действительно так. Но есть другой важный фактор, который "выгодным" (с точки зрения обнаружимости) образом отличает нейтронную звезду в двойной системе от одиночной нейтронной звезды. Вспомним, что подавляющая часть энергии ( $\sim 99,99\%$ ), теряемой одиночным радиопульсаром в виде релятивистских частиц и низкочастотных электромагнитных волн, не наблюдаема. Другое дело — в двойной системе. Нормальная звезда может перехватывать существенную долю релятивистского ветра ( $\geq (1/4) \cdot (R_0/a)^2$ , где  $R_0$  — радиус нормальной звезды) и перерабатывать в виде, доступном для детектирования на Земле. Возникает своеобразный аналог классического эффекта отражения, или эффекта прогрева (Липунов, 1980а; Липунов и Прохоров, 1984). Основные механизмы переработки — это синхротронное излучение релятивистских частиц в магнитном поле нормальной звезды и ядерные превращения частиц сверхвысоких энергий при столкновении с веществом звездного ветра самой звезды.

Полная мощность переработанной таким образом энергии релятивистских частиц оценивается в виде

$$L_{ref} \approx \frac{1}{6} \left( \frac{R_{eff}}{a} \right)^2 \frac{\mu^2 \omega^4}{c^3} \approx 10^{31} \rho_{eff}^2 \mu_{30}^2 \nu^{-4} \text{ эрг/с,}$$

где  $\rho_{eff} = R_{eff}/a$  — характерный размер области перехвата, выраженный в

единицах большой полуоси ( $R_{eff} \geq R_0$ ). Для тесных двойных систем  $\rho_{eff} \approx \approx 0,1 - 0,3$  и коэффициент переработки может достигать нескольких процентов.

Наряду с эффектом отражения могут наблюдаться явления нестационарного всплывания и вспыхивания каверн — феномен радиобарстера (см. § 5 этой главы).

**Наблюдаемые свидетельства существования эжектирующих звезд в двойных системах.** Вероятными кандидатами в рассматриваемый класс объектов прежде всего являются источники переменного нетеплового радиоизлучения, отождествленные с двойными звездными системами. Это источники типа Cyg X-3, Cir X-1, LSI +61°. Отметим, что впервые модель молодого радиопульсара в двойной системе Cyg X-3 была предложена Сюняевым (1974). Для всех трех источников характерно переменное нетепловое радиоизлучение (см. Николсон, 1984; Молнар и др., 1984). Для систем Cir X-1 и LSI +61° наблюдается строгая периодичность — излучение приходит в виде радиовспышек с орбитальным периодом двойной системы.

Крайне интересно открытие периодического излучения сверхвысоких энергий ( $\geq 10^{15}$  эВ) от источника Cyg X-3 (Степанян, 1984). Этот факт находит в настоящее время все более полное подтверждение и ставит ряд не только астрофизических, но и физических проблем (см., например, Ойяма и др., 1986).

Большой интерес вызывает сообщение Эбота и др. (1984) об открытии нетеплового радиоизлучения от горячих OB и WR-звезд. Авторы считают, что значительная часть ( $\sim 10\%$ ) так называемых "одиночных" OB-звезд обладает таким радиоизлучением. В принципе это не противоречит результатам численного моделирования эволюции нейтронных звезд (гл. X), согласно которым большая часть нейтронных звезд в двойных системах должна находиться на стадии эжекции. В ряде случаев переменность радиоизлучения удастся объяснить переменным поглощением радиоизлучения нейтронной звезды в звездном ветре нормального компонента (Липунов и Прохоров, 1986).