

исключаются по двум причинам. Во-первых, для возбуждения гармоник без возбуждения основной моды требуются особые условия. При этом любая небольшая нелинейность приводит к смешиванию мод и нарушению четкости периода. Во-вторых, потеря энергии в колебательной системе обычно приводит к *уменьшению* периода.

Белые карлики в двойных системах удовлетворяют соотношению

$$\Omega^2 r \sim \frac{GM}{r^2}, \quad (10.2.4)$$

где r — радиус орбиты. Поскольку $r \geq R$, мы опять возвращаемся к результату (10.2.3).

Пульсирующая нейтронная звезда имеет плотность примерно в 10^6 раз выше, чем у белого карлика. Поэтому основной период пульсаций равен $\sim 10^{-3}$ с, т.е. слишком короток для типичных случаев.

Подходящим выбором радиуса можно добиться, чтобы орбитальный период двойной системы, содержащей нейтронную звезду, соответствовал наблюдаемому диапазону $10^{-3} - 4$ с. Однако, как мы увидим в упражнении 16.9, такая система будет обильно излучать гравитационные волны, а время ее жизни составит

$$\tau \sim 10^{-3} \left(\frac{P}{1 \text{ с}} \right)^{8/3} \text{ лет}. \quad (10.2.5)$$

Временной масштаб, в пределах которого, судя по наблюдениям, изменяются периоды пульсаров, составляет в типичных случаях $P/P \sim 10^7$ лет; более того, гравитационное излучение заставляет период уменьшаться, а не увеличиваться.

Как мы увидим в гл. 12, изолированная черная дыра не обладает структурой, с которой можно связать периодический излучатель. В частности, вращающиеся черные дыры осесимметричны. Любой механизм, связанный с аккрецией, не может быть периодичным с такой фантастической точностью.

Только вращающаяся нейтронная звезда удовлетворяет всем приведенным выше ограничениям. Кроме того, как мы обнаружим, на основе такой интерпретации хорошо объясняются и некоторые другие факты, следующие из наблюдений.

10.3. НАБЛЮДАЕМЫЕ СВОЙСТВА ПУЛЬСАРОВ

Недостаток места не позволяет нам дать полный обзор всех удивительных свойств пульсаров. Ограничимся кратким рассмотрением наиболее характерных свойств (более полное обсуждение см., например, в [148, 248, 380, 404, 540]).

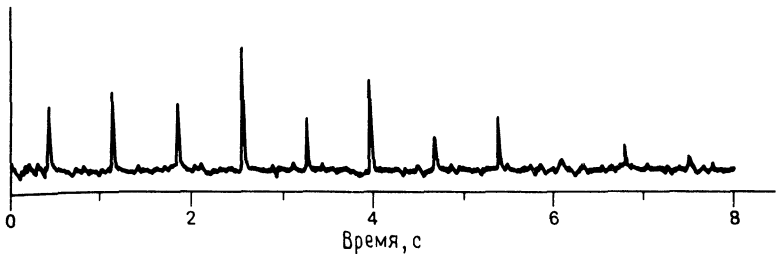


Рис. 10.1. Запись отдельных импульсов пульсара PSR 0329 + 54, открытого одним из первых. Импульсы записаны на частоте 410 МГц при инструментальной постоянной времени 20 мс. Период повторения импульсов составляет около $0,714$ с [380].

а) Формы и спектры импульсов

В настоящее время известно около 350 пульсаров. У всех наблюдается широкополосное радиоизлучение в форме периодических импульсов (рис. 10.1). Интенсивности импульсов меняются в широких пределах, иногда импульсы вообще пропадают. Тем не менее, основная запись импульсов периодическая. Сквозность (доля периода, в течение которой излучение поддается обнаружению) обычно мала (1—5%). При временных масштабах ≤ 1 мс форма импульса довольно сложна. В типичном случае импульс состоит из двух или более субимпульсов. У субимпульсов проявляется сложная микроструктура, которая может иметь малые характерные времена порядка 10 мкс. Однако найдено, что средняя форма нескольких сотен импульсов исключительно стабильна (рис. 10.2). Измеряя времена прихода для одной и той же детали в последовательности усредняемых импульсов, можно показать, что вращающаяся нейтронная звезда является отличными часами. Периоды некоторых пульсаров известны с точностью до 10^{-13} .

Удельная интенсивность¹⁾ радиосигналов изменяется по крутому степенному закону $I_\nu \sim \nu^\alpha$, где значение $\alpha \approx -1,5$ для $\nu < 1$ ГГц, и еще ниже при более высоких частотах. Типичная интенсивность (усредненная по периоду и проинтегрированная по телесному углу) на 400 МГц составляет $\sim 0,1$ Ян [1 Ян = 10^{-23} эрг/(с · см² · Гц)]. Многие пульсары демонстрируют высокую степень линейной поляризации — в некоторых случаях до 100%. Величина линейной поляризации и позиционный угол часто изменяются со временем в пределах импульса. Круговая поляризация встречается не так часто и если присутствует, то бывает не столь сильной как линейная.

¹⁾ Удельная интенсивность I_ν излучения светящегося объекта определяется в приложении И и измеряется в эрг/(с · см² · Гц · стерад) [сравните с уравнениями (И.1) — (И.3)].

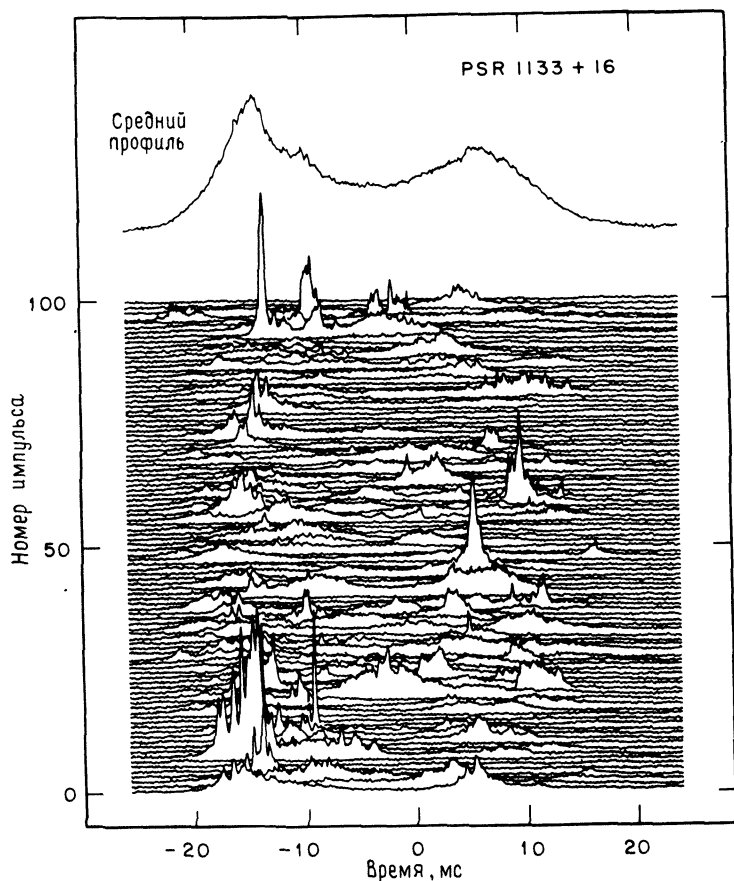


Рис. 10.2. Последовательность ста импульсов пульсара PSR 1133 + 16, записанная на 600 МГц. Средний профиль 500 импульсов приведен сверху. Последовательные импульсы откладываются по вертикали, чтобы продемонстрировать изменения формы отдельных импульсов и моментов прихода; поведение усредненного импульса тем не менее совершенно устойчиво и периодически [148].

б) Периоды

Наблюдаемые периоды пульсаров составляют от 1,558 мс для PSR 1937 + 214 [32] до 4,308 с для PSR 1845 - 19. Второй по кратковременности период у пульсара в Крабовидной туманности PSR 0531 + 21 (0,0331 с), третий — у пульсара Халса—Тейлора PSR 1913 + 16, входящего в двойную систему (0,059 с), а четвертый — у пульсара в созвездии Парусов PSR 0833 - 45 (0,089 с)¹⁾. Медиана периода — 0,67 с.

¹⁾ В 1983 г. был открыт пульсар PSR 1953 + 29 с периодом 6,13317 мс, входящий в двойную систему. [См. *Voriakoff V., Buccheri R., Fauci F. Nature*, 304, № 5925, 417, 1983.] — Прим. ред.

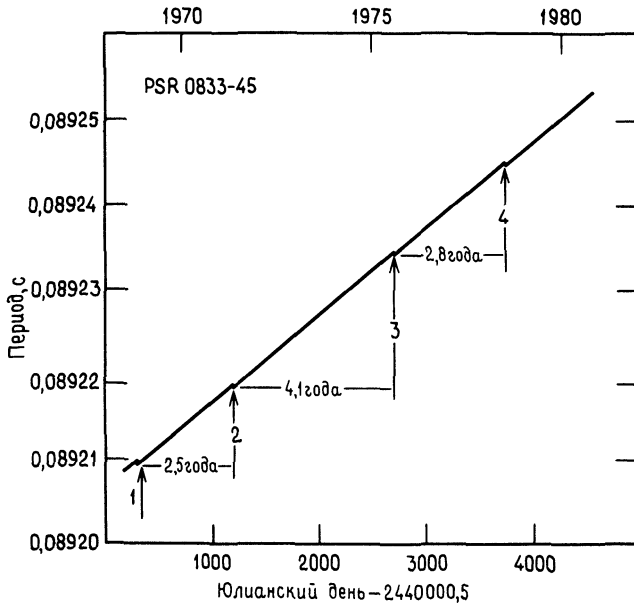


Рис. 10.3. Изменение периода пульсара PSR 0833 — 45 (пульсар в созвездии Парусов) за время от конца 1968 г. до середины 1980 г. Пронумеровано четыре больших скачка и отмечены промежутки времени (в годах) между скачками [168].

Во всех случаях, когда проводились точные наблюдения, было найдено, что периоды пульсаров равномерно увеличиваются (но ниже мы будем обсуждать «сбои»). Типичные значения производной периода $\dot{P} \sim 10^{-15}$ с/с. Из моделей пульсаров вытекает, что их возраст, по-видимому, меньше, чем характерное время $T = P/\dot{P} \sim 10^7$ лет. У пульсаров с более короткими периодами есть тенденция к большим скоростям замедления и к меньшим характерным временам. Для пульсара в Крабовидной туманности $T = 2486$ лет. Однако у пульсара Халса — Тейлора, входящего в двойную систему, $T = 2,17 \cdot 10^8$ лет.

Наиболее заметные нерегулярные изменения периодов у пульсаров — это внезапные возрастания скорости вращения, или сбои, наблюдавшиеся у пульсаров в Крабовидной туманности ($|\Delta P|/P \sim 10^{-8}$) и в созвездии Парусов ($|\Delta P|/P \sim 2 \cdot 10^{-6}$). В каждом из четырех «гигантских» сбоев пульсара в созвездии Парусов, наблюдавшихся до сего времени (рис. 10.3), уменьшение периода сопровождалось увеличением производной периода ($\Delta \dot{P}/\dot{P} \sim 0,01$), которое затухало примерно через 50 дней. Более мелкие скачкообразные увеличения частоты у пульсара в Крабовидной туманности (два из которых зарегистрированы вполне надежно) разнятся

по величине в четыре раза. Они также сопровождались увеличением производной периода ($\Delta\dot{P}/\dot{P} \sim 2 \cdot 10^{-3}$), которое затухало примерно за 10 дней. Мы вернемся к этим данным в разд. 10.10, где будем обсуждать теоретические модели, позволяющие объяснить природу сбоев.

В дополнение к большим скачкам частоты, или «макросбоям», наблюдавшимся у нескольких пульсаров, у значительного числа пульсаров были обнаружены также меньшие по амплитуде нерегулярные флуктуации периодов. Это нерегулярное «дрожание» частоты пульсарных «часов» называют *шумами синхронизации*¹⁾. Шумы синхронизации представляют собой слабые флуктуации частоты повторения импульсов. Они могут возникать при небольших случайных событиях, когда $|\Delta P|/P$ по крайней мере на два порядка величины ниже, чем амплитуда флуктуаций при макросбое. Для пульсара в Крабовидной туманности было показано, что спектр этих шумов по форме не сравним со спектром «гигантских» сбоев, так что они могут представлять совершенно разные явления [82, 249].

в) Пространственное распределение и связь с остатками сверхновых

Мы знаем, что пульсары рождаются в нашей Галактике, поскольку, во-первых, они сконцентрированы к плоскости Галактики (рис. 10.4 и 10.5) и, во-вторых, у них обнаружена *дисперсия*, характерная для прохождения сигналами галактических расстояний (более подробно этот вопрос будет обсуждаться ниже).

Угловое распределение пульсаров в плоскости Галактики похоже на угловое распределение остатков сверхновых и их предполагаемых предшественников — ОВ-звезд, хотя средняя шкала высот распределения над галактической плоскостью несколько выше и составляет ~ 300 пс. Это совместимо с гипотезой, согласно которой пульсары возникают при взрывах сверхновых, приобретая при этом, вероятно, относительно большую скорость. Более впечатляющий аргумент — связь отдельных пульсаров с известными остатками сверхновых. Пульсары PSR 0531 + 21 и PSR 0833 — 45 связаны соответственно с Крабовидной туманностью и с остатком сверхновой в созвездии Парусов. Крабовидная туманность — это остаток сверхновой, наблюдавшейся древнекитайскими астрономами летом 1054 г. н.э. Туманность удалена от нас примерно на 2 кпс и состоит из расширяющихся наружу нитей, излучающих в линиях оптического диапазона, и аморфной среды, испускающей синхротронное излучение. Открытие факта, что пульсар в Крабовидной туманности является неизвестным до того источником энергии туманности и что теоретический возраст пульсара находится в хорошем согласии с фактическим возрастом 926 лет (на 1980 год),

¹⁾ См. [83]. Для детального обсуждения наблюдения шумов синхронизации см. [150] и помещенные там ссылки. Критика различных теоретических моделей, предложенных для объяснения шумов синхронизации, дана в [149] и указанной там литературе.

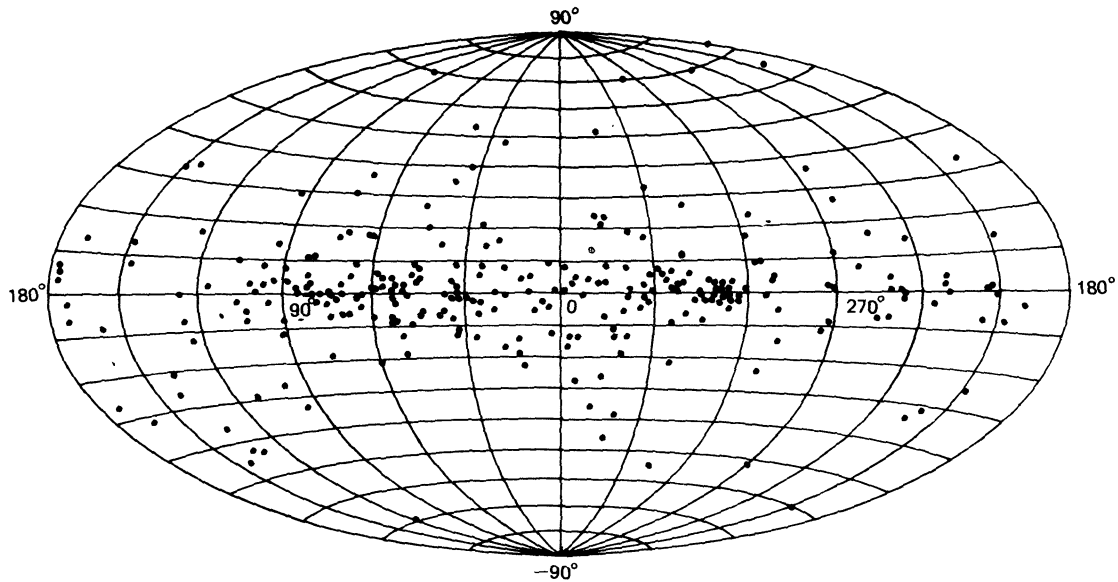


Рис. 10.4. Распределение пульсаров в Галактике. В принятой системе координат широта 0° соответствует плоскости Галактики, а начало координат — направлению на центр Галактики.

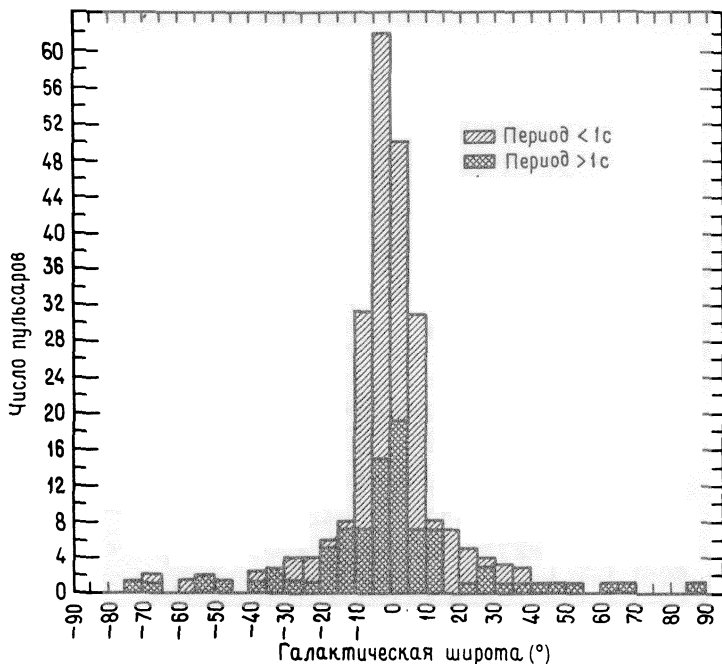


Рис. 10.5. Распределение пульсаров по галактической широте. Широта 0° соответствует плоскости Галактики.

надежно подтвердило модель вращающейся нейтронной звезды для пульсаров (количественное обсуждение см. в разд. 10.5).

Остаток сверхновой в созвездии Парусов имеет возраст, составляющий по оценкам 30 000 — 50 000 лет, т.е. по порядку величины равный характеристическому возрасту PSR 0833 — 45 ($T = 22\,000$ лет). Наряду с согласием в положении и расстоянии ($\alpha \sim 500$ пс) это совпадение служит основным свидетельством в пользу связи пульсара с остатком сверхновой.

В дополнение к двум случаям явной связи пульсара с остатком сверхновой можно отметить еще один пример вероятной и два — возможной связи. Эти примеры относятся к молодым ($\leq 10^5$ лет) пульсарам, так что не удивительно, что больше связей такого рода не было найдено¹⁾. Тем не ме-

¹⁾ Относительно недавно в остатках сверхновых были открыты два пульсирующих рентгеновских источника. Один из них — быстрый рентгеновский пульсар ($P = 0,15$ с), похожий на пульсар в Крабовидной туманности [520], а второй — гораздо более медленный ($P = 3,5$ с) [191]. Сообщалось об обнаружении радиоизлучения от первого из этих источников [382]. Как полагают, оба они представляют собой вращающиеся нейтронные звезды.

нее может показаться странным, что из полдюжины (или около того) галактических сверхновых, зарегистрированных за последние 2000 лет, только в Крабовидной туманности содержится пульсар. Возможно, механизм излучения является сильно направленным или может оказаться, что не все сверхновые образуют пульсары (см. гл. 1 и 11).

10.4. МЕРА ДИСПЕРСИИ

Оценка расстояния до каждого из пульсаров получается на основании его меры дисперсии DM , определяемой как

$$DM \equiv \int_0^L n_e dl \equiv \langle n_e \rangle L, \quad (10.4.1)$$

где L —расстояние до пульсара, n_e —электронная концентрация, а l —длина пути вдоль луча зрения. Мера дисперсии обычно выражается в пс/см³. Само название «мера дисперсии» возникло по той причине, что электромагнитные волны претерпевают дисперсию под действием проводящей межзвездной среды. При этом широкополосный импульс на более низких частотах достигает Земли позднее, чем на более высоких.

Для количественного рассмотрения вспомним, что ускорение электрона с зарядом $-e$ в разреженной плазме под действием распространяющейся электромагнитной волны с частотой ω определяется выражением

$$m\ddot{x} = -eE, \quad (10.4.2)$$

где электрическое поле можно записать в виде

$$E = E_0 e^{i\omega t}. \quad (10.4.3)$$

Таким образом,

$$x = \frac{e}{m\omega^2} E, \quad (10.4.4)$$

так что поляризация среды равна

$$P = n_e(-e)x = -\frac{n_e e^2}{m\omega^2} E. \quad (10.4.5)$$

Однако

$$P = \frac{\epsilon - 1}{4\pi} E, \quad (10.4.6)$$

где ϵ — диэлектрическая постоянная. Следовательно,

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (10.4.7)$$