

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.84

## ПУЛЬСАРЫ \*)

Д. тер Хаар

*Данные наблюдений. — Модели пульсара. — Двойной пульсар PSR 1913 + 16*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В 1974 г. Нобелевская премия по физике была присуждена М. Райлу за его «пионерские работы в области радиоастрономии», особенно за работы по апертурному синтезу, и А. Хьюишу за открытие пульсаров. Впервые такой чести удостоены астрономы, хотя Бете получил в 1967 г. Нобелевскую премию за работы по ядерному синтезу в звездах, т. е. за приложение физических исследований к астрономии, а в 1907 г. Майкельсон стал нобелевским лауреатом за оптическую интерферометрию, включающую в себя и звездную интерферометрию. Радиоастрономия начала бурно развиваться после войны, когда Оорт осознал возможность ее использования в качестве нового инструмента для исследования небесных объектов. Связанное с войной развитие техники сделало возможным постройку новых мощных радиотелескопов. Радиоастрономия принесла с собой много волнующих загадок, которые мы постепенно начинаем разгадывать. Одна из наиболее интересных — пульсары. Летом 1967 г. радиоастрономическая группа в Кембридже запустила свой новый радиотелескоп. Этот инструмент был создан для изучения мерцаний радиоисточников с малыми угловыми размерами. Эти мерцания создаются облаками плазмы солнечного ветра при движении Земли по орбите вокруг Солнца. Типичное характерное время таких мерцаний порядка доли секунды, т. е. типичное время периода пульсара, и кембриджский телескоп мог бы поэтому с таким же успехом создаваться и для открытия пульсаров. Открытие пульсаров аспиранткой Хьюиша Жаклин Белл можно отнести, вероятно, к августу 1967 г. Однако, даже спустя столь короткое время после открытия, его дата не вполне ясна. Интересно процитировать самого Хьюиша. В оригинальной статье, опубликованной в февралье 1968 г., утверждается: «самая первая запись, пригодная для измерения координат, была получена 13 августа 1967 г.» В 1968 г. Хьюиш писал: «Рутинные обзоры начались в июле 1967 г., и впервые в истории радиоастрономии значительная часть неба подвергалась повторным обзорам с высокой чувствительностью... техника записи была особенно чувстви-

\*) D. ter Haar, Pulsars, Contemp. Phys. 16, 243 (1975). Для публикации перевода в УФН автор прислал новый вариант гл. 4 статьи. Перевод Н. И. Гинзбург. Д. тер Хаар — профессор факультета теоретической физики в Оксфорде, Англия.

тельна к радиоисточникам с флуктуирующей интенсивностью, и поэтому совершенно случайно возникли идеальные условия для детектирования пульсаров. Данные обзора записывались на ленту самописца, длина которой составляла примерно 400 футов в неделю, и часть анализа, проводимого мисс Белл, представляла собой график в небесных координатах положения всех мерцающих источников... К концу августа она обнаружила более чем в одном случае мерцающий источник, который был подозрителен... В связи со спорадической природой... мы считаем, что имеем дело с какой-то интерференцией... Отсутствие поддающегося измерению параллакса говорило о том, что источник должен быть расположен далеко за пределами нашей солнечной системы... В течение октября и ноября интенсивность источника стала слабой, и только 28 ноября были проведены первые удовлетворительные наблюдения. На полученной записи можно было различить импульсы, которые уже означали открытие пульсаров, но лишь несколько дней спустя, когда эти импульсы подтвердились, результаты были признаны истинными». В 1969 г. Хьюиш добавил к этому: «Радиосигналы первого пульсара были фактически получены 6 августа, хотя только в декабре 1967 г. был осознан уникальный характер пульсирующего излучения, и поэтому датой открытия нужно считать последнюю». Примерно к этому же времени было обнаружено, что продолжительность повторяющихся каждые 1,3 сек импульсов составляет около 20 мсек. Это означало, что источник имеет размер планеты и (я опять цитирую Хьюиша) «нельзя было больше игнорировать возможность, что сигналы могут приходить от внеземной цивилизации. Быстрое изменение амплитуды импульса наводило на мысль о каком-то коде, но интенсивные наблюдения... не принесли никаких сведений для расшифровки». На оригинальных графиках пульсары обозначали как LGM1, LGM2, . . . (что означает «Little Green Man» — «Маленький зеленый человечек»). Затем были проведены измерения с целью найти эффект Доплера, который мог бы указать на орбитальное движение источника. Полное отсутствие эффекта Доплера, а также открытие (которое было сделано мисс Белл при повторном изучении трехмильных записей) еще трех пульсаров, расположенных в различных точках неба, подтвердило окончательно, что пульсары — естественные астрофизические объекты.

Мы уже отметили, что проведенный мисс Белл обзор привел к открытию четырех пульсаров — или, как их назвали сначала, пульсирующих радиоисточников. Термин «пульсар» был введен Дрейком, который первым использовал его в своей статье, опубликованной в апреле 1968 г. Изучение межпланетных мерцаний уже было признанным радиоастрономическим методом, и поэтому несколько групп радиоастрономов, имеющих соответствующее оборудование, начали поиски пульсаров и очень скоро обнаружили еще несколько. К январю 1969 г. уже было известно 25 пульсаров, к августу 1971 г. — 55, к январю 1972 г. — 62, а последний список, составленный Тейлором и Манчестером, содержит уже 140 пульсаров. Сначала пульсары обозначали в согласии с открывшими их группами; например, CP и JP означали пульсары, открытые в Кембридже, и пульсары, открытые в Джодрелл-Бэнк. Но теперь пользуются обозначением PSR, предложенным австралийской группой радиоастрономов из Молонгло. После индекса PSR следуют два числа, указывающие на положение пульсара на небе: первое число означает прямое восхождение  $\alpha$ , а второе — склонение  $\delta$ . Например, PSR 1913 + 16 — пульсар с  $\alpha = 19$  час. 13 мин. и с  $\delta = +16^\circ$ .

После открытия первых пульсаров, все периоды которых были порядка 1 сек, групп в Молонгло нашла пульсар PSR 0833-45 с коротким периодом всего в 89 мсек, расположенный в сложной радиоизлучающей области

внутри протяженного радиоисточника Вела X (созвездие Паруса), являющегося остатками сверхновой. Эта связь между сверхновыми и пульсарами, которую мы обсудим ниже, подтверждена позже открытием пульсара PSR 0531 + 21 в Крабовидной Туманности — остатке сверхновой, взрыв которой видели китайские астрономы в 1054 г. Этот пульсар с периодом 33 мсек пока самый быстрый и единственный с наблюдаемыми оптически импульсами, хотя из теоретических соображений можно было бы ожидать, что импульсы других пульсаров также могут наблюдаться в видимой или в инфракрасной области — однако тщательные поиски пока не привели к обнаружению никакого другого оптического пульсара. Пульсар в Крабовидной Туманности испускает также рентгеновские и  $\gamma$ -импульсы. Существует также целый ряд рентгеновских источников, дающих импульсное излучение, но, поскольку их поведение, по-видимому, отлично от радиопульсаров и они не обнаруживают радиоимпульсов, мы не станем касаться их в настоящей статье. Недавно нашли, что пульсар в Веле также излучает  $\gamma$ -импульсы.

Как только утихли первые волнения, связанные с открытием пульсаров, много усилий было направлено, с одной стороны, на изучение характеристик излучения и, с другой — на попытки удовлетворительно объяснить данные наблюдений. Одновременно велись систематические поиски пульсаров. В 1972 г. Рудерман<sup>1</sup> писал: «Многое теперь, по-видимому, понятно об этих восхитительных и удивительных объектах — кроме понимания того, как они пульсируют. Из наблюдений пульсаров получено уже так много данных, что нельзя быть до такой степени оптимистом, чтобы считать, что дальнейшие наблюдения периодических радиосигналов предоставят новую решающую информацию». Когда это было написано, предсказание было вполне обосновано, хотя число наблюдаемых пульсаров достигло 58.

Действительно, многочисленные данные наблюдений снабжали теоретиков все новыми данными, однако никаких существенных новых свойств выявить не удавалось. Вероятно, единственной существенно новой информацией, полученной при наблюдениях, явилось открытие двойного пульсара PSR 1913 + 16, который был также вторым из самых быстрых пульсаров (его период равен 59 мсек). Мы обсудим подробнее свойства этого пульсара в конце статьи. В следующем разделе мы дадим краткий обзор тех экспериментальных данных, которые наиболее интересны с общей точки зрения и которые, по нашему мнению, наиболее существенны для понимания пульсаров. Мы скажем также несколько слов о распределении пульсаров в пространстве. В разделе 3 будут обсуждены модели пульсаров, т. е. модели самого объекта и кратко — механизма излучения. В последнем разделе мы обсудим открытый Холсом и Тейлором<sup>2</sup> двойной пульсар PSR 1913 + 16.

## 2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Хотя импульсы пульсара следуют друг за другом чрезвычайно регулярно, интенсивность его излучения сильно меняется как за короткие отрезки времени (т. е. он сильно флуктуирует по интенсивности от импульса к импульсу), так и за длительное время порядка недель или месяцев. Кроме того, сами импульсы обладают тонкой структурой, большая часть которой, вероятно, не связана с шумом в инструменте. Фактически у некоторых пульсаров, внутри главного импульса существуют подимпульсы, которые меняют свое положение со временем. С другой стороны, если импульсы усреднять за время, равное нескольким минутам, т. е. если сложить несколько сот импульсов, то для каждого пульсара получим

характерную форму импульса, можно сказать, почерк, который присущ лишь данному пульсару. (Некоторые из этих импульсов приведены на рис. 1.) Отметим, что некоторые формы импульсов относительно просты,

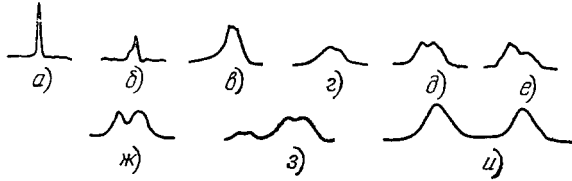


Рис. 1. Некоторые типичные средние формы импульсов.

а) PSR 0833—45, б) PSR 0329 + 54, в) PSR 0950 + 0,8, г) PSR 0809 + 74, д) PSR 0834 + 06, е) PSR 1919 + 21 (первый открытый пульсар), ж) PSR 1133 + 16, з) PSR 2045 + 16, и) PSR 0525 + 21.

другие же весьма сложны. Хьюгенин, Тейлор и Манчестер<sup>3</sup> показали, что пульсары можно разделить на три класса. Пульсары типа S (рис. 1, а—в) имеют импульсы простой формы обычно с коротким периодом, и их излучение может быть как сильно, так и слабо поляризовано. Пульсары типа C

(рис. 1, д, ж—и) имеют импульс сложной формы с несколькими сильными компонентами, и обычно их излучение обладает сильной линейной поляризацией. Пульсары типа D (рис. 1, г и е) обладают дрейфующими подымпульсами. Заметим здесь, что характерную форму импульса часто называют «окном импульса»; внутри отдельного импульса содержится много более узких подымпульсов, ширина которых составляет обычно около 10% от ширины самого окна.

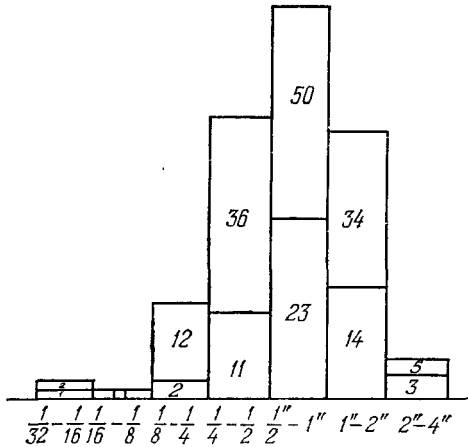


Рис. 2. Распределение периодов пульсаров. Верхние (нижние) числа соответствуют данным о 140 (55) пульсарах, известным к декабрю 1974 и августу 1971 г. соответственно.

Ширина окна, как правило, равна 3 или 4% периода. Этот размер меняется, однако, от ширины, меньшей 1%, до ширины, равной 16%, хотя лишь у пяти из 117 пульсаров в списке Тейлора и Манчестера ширина импульса

меньше 1% и только у двух эта<sup>3</sup> ширина больше 10%. Как мы отмечали во введении, типичный период пульсара порядка секунды. Фактически из 140 пульсаров в списке Тейлора и Манчестера периоды 120-ти лежат между 0,25 сек и 2 сек. На рис. 2 приведена гистограмма распределения периодов и для сравнения дано такое же распределение, когда было известно всего 55 пульсаров. Можно видеть, что общий характер распределения не изменился; добавились лишь два относительно медленных пульсара PSR 0153 + 61 (период 2,35 сек) и PSR 1910 + 20 (период 2,23 сек) и двойной пульсар PSR 1913 + 16. Резкое уменьшение числа пульсаров с периодами, меньшими 0,25 сек или большими 2 сек, почти наверняка явление истинное, а не ошибка наблюдений. По-видимому, лишь немногие пульсары имеют короткие периоды, а пульсары с более длинными периодами выпадают в силу того, что их радиосветимость становится слишком слабой для детектирования.

Период пульсара чрезвычайно постоянен, и часто величины периодов известны с точностью до восьмого или девятого знака. Например, период пульсара PSR 0301 + 19 равен  $1,38758357943$  сек с ошибкой  $0,02$  нсек! Периоды медленно возрастают с типичной скоростью порядка от  $10^{-14}$  до  $10^{-18}$ , что соответствует характерному времени (получаемому при делении этого периода на скорость его изменения), порядка нескольких миллионов лет. Это означает, что периоды большинства пульсаров за время их наблюдения изменялись меньше, чем на одну миллионную часть. До последней осени периоды пульсаров в Крабе и Веле изменялись быстрее всех, но эта явная корреляция между скоростью изменения периода и самим периодом не подтверждается данными о других пульсарах, а скорость изменения периода двойного пульсара меньше, по-видимому, чем для пульсара в Веле, хотя его период короче.

К настоящему времени производные периода по времени измерены уже для 68 пульсаров и дана ее оценка для пульсара PSR 1913 + 16. Из 68 пульсаров, входящих в список каталога Джодрелл-Банк, составленный Зейцадакисом, у семи пульсаров величина отношения периода к его производной по времени меньше  $4 \cdot 10^5$  лет. Это пульсары: PSR 0531 + 21 ( $2,4 \cdot 10^3$  лет, период 33 мсек), PSR 0833—45 ( $2 \cdot 10^4$  лет, период 89 мсек), PSR 1727—47 ( $14 \cdot 10^4$  лет, период 0,8 сек), PSR 0611 + 22 ( $18 \cdot 10^4$  лет, период 0,33 сек), PSR 0740—28 ( $3 \cdot 10^5$  лет, период 0,17 сек), PSR 1747—46 ( $3 \cdot 10^5$  лет, период 0,7 сек) и PSR 0153 + 61 ( $4 \cdot 10^5$  лет, период 2,4 сек). С другой стороны, у двух пульсаров значение этого отношения превышает  $5 \cdot 10^8$  лет; это пульсары PSR 1944 + 17 ( $6 \cdot 10^8$  лет, период 0,44 сек) и PSR 1952 + 29 ( $4 \cdot 10^9$  лет, период 0,43 сек). Из приведенных данных видно, что между периодом и его производной четкой корреляции нет.

Мы построили изображенный на рис. 3 график зависимости характерного времени от периода. Лин, Ритчини и Смит<sup>4</sup> исследовали статистическую зависимость между периодом, его производной, напряженностью магнитного поля, интегральной шириной импульса и предполагаемым возрастом. Их цифры не указывают на наличие ярко выраженной корреляции, особенно между  $P$  и  $dP/dt$ .

Периоды пульсаров в Крабе и Веле претерпевают резкие изменения — внезапное сокращение периода, называемое скачком («glitch»), сопровождаемое затем постепенным его возрастанием. Изменение периода в случае первого наблюдавшегося скачка для пульсара в Веле (после этого наблюдался и второй скачок) изображено на рис. 4.

Мы уже отмечали, что излучение многих пульсаров сильно поляризовано. Это особенно проявляется у пульсаров С-типа. Отдельные импульсы часто сильно поляризованы. За исключением отдельных случаев круговой поляризации, большинство данных указывает на поляризацию линейную. Во многих случаях позиционный угол в течение импульса

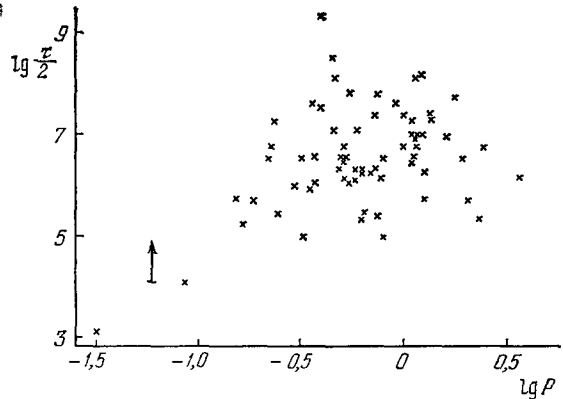


Рис. 3. График в логарифмической шкале зависимости  $\tau/2$  от  $P$ .

$P$  — период в сек, а  $\tau = P/(dP/dt)$  — время в годах. Данные взяты из таблицы, составленной Зейцадакисом.

изменяется неравномерно — не только для индивидуального импульса, но также при усреднении по большому числу импульсов.

Изучение пульсаров проводят в полосе радиочастот примерно от 40 *Мгц* до 8 *Ггц*. Пульсар в Крабе, для которого обнаружены также импульсы в области инфракрасных, видимых, рентгеновских и  $\gamma$ -частот, является исключением. Наблюдается несколько частотных эффектов. Отметим три из них: изменение времени прибытия, размазывание импульсов и вариации интенсивности с частотой. Межзвездная среда между пульсаром и Землей содержит газ, который вблизи звезды ионизован (так называемые области *Н I*), а в других местах в основном нейтрален

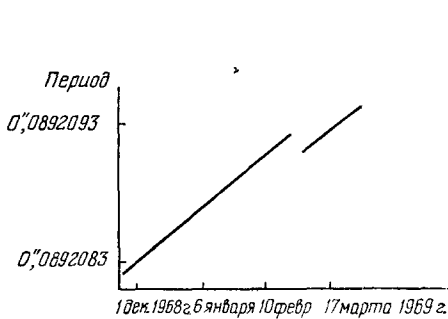


Рис. 4. «Скачок» периода  $\frac{1}{2}$  пульсара в Веле, произошедший в феврале 1969 г.

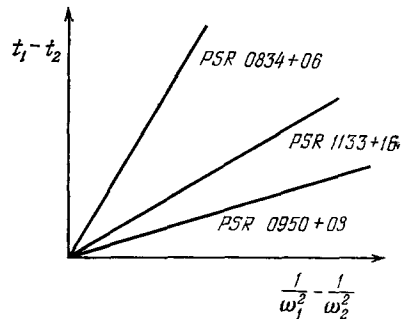


Рис. 5. Запаздывание времени прибытия сигналов для трех пульсаров. Измерения велись на четырех частотах.

(области *Н I*). Однако даже области *Н I* слегка ионизованы космическими лучами. Это означает, что посылаемые пульсаром широкополосные радиосигналы должны пройти через плазму. Плазма обладает зависящими от частоты показателями преломления, и в результате групповая скорость сигнала  $v_{gr}$  зависит от его частоты. Частотная зависимость описывается выражением

$$v_{gr} \sim c - \frac{2\pi n_e c e^2}{m_e \omega}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме,  $e$  и  $m_e$  — заряд и масса электрона,  $\omega$  — несущая частота сигнала и  $n_e$  — электронная концентрация. Следовательно, если узкий широкополосный сигнал достигает нас, пройдя расстояние  $L$ , временная разность  $t_1 - t_2$  между прибытием сигнала на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  определяется формулой

$$t_1 - t_2 = \frac{2\pi e^2}{m_e c} n_e L \left( \frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_2^2} \right), \quad (2)$$

если  $n_e$  вдоль пути сигнала постоянна, и формулой

$$t_1 - t_2 = \frac{2\pi e^2}{m_e c} \left( \frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_2^2} \right) \int n_e dl, \quad (3)$$

если  $n_e$  вдоль пути меняется, что обычно и имеет место. Наблюдения дают именно такую линейную зависимость от  $\omega^{-2}$  (рис. 5). По наклону линия зависимости  $t_1 - t_2$  от  $\omega_1^{-2} - \omega_2^{-2}$  определяет так называемую меру дисперсии,  $\int n_e dl$ . Из меры дисперсии можно получить среднюю концентрацию электронов в межзвездном пространстве (если известно расстояние до пульсара) или, наоборот, найти расстояние до пульсара (если известна концентрация электронов).

При определении расстояния до пульсара нужно учитывать области III, где концентрация  $n_e$  высока. Это впервые было выполнено Прентисом. Если мы знаем расстояния до пульсаров, можно выяснить их распределение в пространстве. Прентис нашел, что это распределение (пока речь идет о близрасположенных пульсарах) обнаруживает острый максимум в плоскости на расстоянии примерно в  $20 \text{ пс}$  ( $1 \text{ пс} \sim 3 \text{ свет. года} \sim 3 \cdot 10^{13} \text{ км}$ ) от Солнца и совпадающей со средней плоскостью распределения ярких звезд. Это подтвердило заключение, что Солнце расположено на расстоянии в  $20 \text{ пс}$  от галактической плоскости. Ширина распределения пульсаров по высоте над или под плоскостью Галактики, а также отсутствие корреляции между распределением

пульсаров в спиральных рукавах Галактики дало возможность Прентису сделать вывод, что пульсары представляют собой объекты с большими скоростями, покидающие вскоре после своего рождения область, где они возникли. Пульсары на далеких расстояниях не видны. Из 138 пульсаров, расстояния до которых приводят Тейлор и Манчестер, 21 лежат ближе  $500 \text{ пс}$ , 20 — между  $500$  и  $1000 \text{ пс}$ , 20 — между  $1$  и  $2 \text{ кпс}$  и 15, 8, 13, 6, 7, 11, 6, 3, 2 и 3 — в интервалах 2—3; 3—4; 4—5, . . . . ., 13—14  $\text{кпс}$  соответственно. Если распределение пульсаров однородно в пространстве и если мы смогли бы наблюдать все пульсары, то должно было бы иметь место квадратичное увеличение их числа с расстоянием (при рассмотрении равных интервалов).

Из полученных данных очевидно, что мы наблюдаем лишь расположенные вблизи нас пульсары, ибо нет никаких оснований полагать, что плотность пульсаров вблизи Солнца превышает их плотность в других местах нашей Галактики. Хьюиш считает, что теперь, вероятно, мы увидели все пульсары, расположенные от Земли на расстояниях примерно до  $500 \text{ пс}$ . Если это так, то в одном  $\text{кпс}^3$  содержится приблизительно от 50 до 100 пульсаров, а в нашей Галактике от  $10^4$  до  $10^6$ . В согласии с упомянутым выше характерным временем и тем фактом, что не наблюдали ни одного очень медленного пульсара, можно заключить, что пульсары видны до возраста примерно  $10^7$  лет. Таким образом, один пульсар образуется примерно раз в столетие. Электронная концентрация межзвездного газа далеко неоднородна, и эти флуктуации плотности должны вызывать, с одной стороны, флуктуации интенсивности со временем порядка минут, часов и даже дней (но не изменений от импульса к импульсу или флуктуаций за месяц или дольше, что было бы проявлением свойств самого источника). С другой стороны, вызванные флуктуациями плотности, дифракционные эффекты должны приводить к размыванию сигнала во времени, а следовательно, и к размыванию (или уширению) импульса. Этот эффект изображен на рис. 6 для пульсара в Крабе; легко видеть, что на  $111 \text{ Мгц}$  импульсная природа излучения практически полностью исчезает.

И наконец, частота оказывает влияние на энергетический спектр: ниже примерно  $100 \text{ Мгц}$  плотность потока  $S$  пульсаров быстро падает, но это может быть связано, по крайней мере частично, с упомянутым выше уширением импульса. В случае, например, пульсара PSR 0833—45 на  $80 \text{ Мгц}$  был обнаружен совпадающий с пульсаром точечный источник, поток которого при экстраполяции согласуется с основной частью спектра.

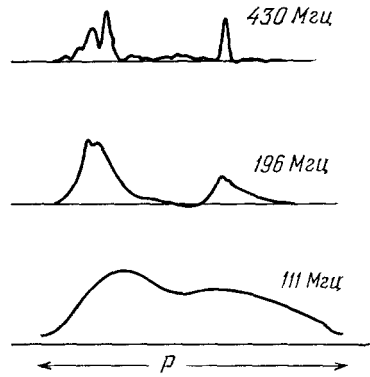


Рис. 6. Форма импульса на разных частотах для пульсара PSR 0531 + 21.

Основная часть спектра пульсара подчиняется типичному степенному закону  $S = S_0 (\omega_0/\omega)^\alpha$  с  $\alpha$ , лежащей обычно между  $-1$  и  $-2$  (если рассматриваем спектр между  $0,4$  и  $1,4$  Гц). Тейлор и Манчестер приводят 33 значения  $\alpha$ , одно из которых отрицательно, девять лежат в интервале между  $0$  и  $1$ , четырнадцать — между  $1$  и  $2$ , семь — между  $2$  и  $3$  и два значения больше трех. Для пульсара в Крабе в области между  $10$  Гц и инфракрасными частотами поток очень мал, но в оптической области имеется второй максимум.

### 3. МОДЕЛИ ПУЛЬСАРА

При попытке построения моделей как самих пульсаров, так и их радиоизлучения нужно принимать во внимание следующие данные наблюдений:

1) Окно импульса повторяется с периодом  $P$  порядка  $1$  сек. Значения  $P$  лежат в интервале между  $0,03$  и  $3,8$  сек, но большая часть значений  $P$  попадает в интервал между  $0,5$  и  $2$  сек.

2) Период  $P$  стабилен с точностью больше  $10^{-8}$ .

3) Все пульсары постепенно замедляются, хотя могут возникать скачки, т. е. внезапное ускорение вращения.

4) Замедление, измеряемое по  $dP/dt$ , характеризуется временем  $\tau$  ( $= P (dP/dt)^{-1}$ ), типичное значение которого лежит между  $2 \cdot 10^5$  и  $10^8$  лет, хотя, по-видимому, между  $\tau$  и  $P$  корреляция слаба (см. рис. 3).

5) Каждому пульсару соответствует характерное окно импульса, которое может иметь весьма сложную форму; типичная ширина окна порядка  $4\%$  от периода.

6) Многие пульсары имеют очень сильную линейную поляризацию.

7) Кроме пульсара в Крабе, ни один другой пульсар не излучает одновременно в радио- и оптической и рентгеновской областях,  $\gamma$ -излучение испускают лишь пульсары в Крабе и Веле.

Начнем обсуждение с пунктов 1) и 2). Нужно найти обеспечивающий точное повторение импульсов механизм с характерным временем около  $1$  сек или меньше.

В таких случаях астрономы думают об орбитальном движении, о пульсациях или о вращении.

Начнем с орбитального движения. Чтобы получить как можно более короткий период, мы должны рассматривать две звезды с массой  $M$  и с радиусом  $R$ , вращающихся предельно близко друг от друга (на расстоянии  $2R$ ), и пренебрегать при этом всеми осложнениями, возникающими от этой их близости. Согласно закону Кеплера период  $P$  равен

$$P = \sqrt{\frac{8\pi^2 R^3}{GM}} = \sqrt{\frac{6\pi}{G\bar{\rho}}} \approx \frac{12 \cdot 10^4}{\sqrt{\bar{\rho}}} \text{ сек}, \quad (4)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная и  $\bar{\rho}$  — средняя плотность звезды в  $г \cdot см^{-3}$ . При  $P \sim 1$  сек необходима плотность не меньше  $10^8$   $г \cdot см^{-3}$ . Это означает, что мы имеем дело с белыми карликами или нейтронными звездами.

К такому же заключению относительно  $\bar{\rho}$  мы приходим при рассмотрении пульсаций звезд. Если обратиться к вращению, то из требования, что центробежная сила на экваторе не должна превышать силу тяжести, также получим значение  $\bar{\rho}$ , по крайней мере в несколько раз превышающее  $10^8$   $г \cdot см^{-3}$ . Прежде чем перейти к подробному рассмотрению этих трех «часовых механизмов», интересно отметить, что и белые карлики, и нейтронные звезды являются, как полагают, конечными продуктами звездной



эволюции. Как только в звезде выгорает ядерное топливо, она сжимается. Из теоретических соображений следует, что вещество может сжиматься до тех пор, пока его плотность не станет порядка  $10^9 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . До этой плотности звезда устойчива, ибо создаваемое электронами фермиевского моря давление может уравновешивать гравитационное давление. Если давление растёт дальше, возникает гравитационный коллапс, продолжающийся до тех пор, пока плотность не достигает ядерных значений (т. е. примерно  $10^{13} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ), при которых давление нуклонов в их море Ферми уравновешивает гравитационное давление. Если плотность продолжает расти и дальше и если ее значение превысит величину, равную примерно  $10^{16} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ , возникает неустойчивость, снова приводящая к гравитационному коллапсу, в результате которого, может быть, образуются черные дыры. Из теории эволюции звезд следует, что звезда с массой, меньшей или порядка одной солнечной массы, может сжаться до плотности около  $10^8 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  с образованием белого карлика. Белые карлики наблюдают, конечно, уже давно. Если масса звезды лежит примерно в области между одной и десятью солнечными массами, сердцевина звезды коллапсирует дальше стадии белого карлика с достижением ядерных плотностей. Огромное количество освобожденной энергии приведет к взрыву и расширению окружающего вещества, т. е. к взрыву сверхновой, после которого останется сердцевина с массой порядка  $10^{14} \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . Эти сердцевинки и есть нейтронные звезды, существование которых Ландау предположил в 1932 г., но они не были обнаружены, пока не открыли пульсары. После обнаружения пульсаров исследование свойств нейтронных звезд привлекло к себе большое внимание, хотя остается еще много различных нерешенных проблем, касающихся природы ядерного вещества. Мы знаем, однако, что масса нейтронных звезд порядка одной массы Солнца, радиус порядка 10 км, а температура поверхности порядка  $10^6 \text{ К}$ .

Рассмотрим теперь по очереди орбитальное движение белых карликов и нейтронных звезд, пульсации белых карликов и нейтронных звезд, вращение белых карликов и вращение нейтронных звезд. Орбитальное движение не подходит по двум причинам. Во-первых, сигналы пульсара должны были бы давать эффект Доплера, но, как уже упоминалось во введении, такого эффекта обнаружить не удалось — за исключением случая двойного пульсара. Во-вторых, орбитальное движение с периодом порядка 1 сек должно было бы, согласно теории относительности, сопровождаться испусканием гравитационного излучения с мощностью, увеличивающей период значительно сильнее, чем это наблюдается. Пульсации также можно исключить. Во-первых, затухание пульсаций должно было бы приводить не к удлинению периода, а к его уменьшению. Во-вторых, периоды пульсаций белых карликов составляют по крайней мере 2 сек, если должным образом учесть все эффекты, включая релятивистские, а для нейтронных звезд период пульсаций получается порядка миллисекунд. Наблюдаемые значения периодов пульсаров по порядку величины лежат между двумя этими пределами. Вращающиеся белые карлики нужно также исключить, поскольку их период должен быть больше примерно 5 сек (в противном случае центробежные силы приведут к разрушению звезды). Таким образом, в качестве разумной модели для пульсара остается лишь вращающаяся нейтронная звезда. Это заключение теперь является, по-видимому, общепризнанным, хотя недавно Мертц выдвинул оригинальное предположение, что пульсары это не вращающиеся нейтронные звезды, а своеобразные мазеры.

Для определенности предположим, что пульсары — вращающиеся нейтронные звезды, образовавшиеся при взрывах сверхновых. Число пульсаров в нашей Галактике и их возможное время жизни говорит

в пользу этой гипотезы, поскольку в Галактике в среднем за столетие происходит один взрыв сверхновой. Если радиус первоначальной звезды порядка радиуса Солнца, то в результате коллапса этот радиус уменьшится в  $10^5$  раз и, следовательно, период вращения должен, грубо говоря, уменьшиться в  $10^{16}$  раз (если сохраняется кинетическая энергия вращения). Это приведет к периоду порядка  $10$  *мксек* (если первоначальный период был порядка одного дня). Однако достижение столь короткого периода маловероятно, поскольку задолго до этого конфигурация должна стать вращательно неустойчивой. Можно поэтому ожидать, что период сразу после образования нейтронной звезды будет порядка нескольких *мсек*, что соответствует как раз конфигурации, устойчивой относительно вращения. Учитывая то обстоятельство, что между  $P$  и  $dP/dt$  сильной корреляции, по-видимому, нет, и зная, что все пульсары замедляются, можно с большой степенью точности полагать, что пульсары рождаются с весьма различными начальными периодами. Если во время коллапса магнитный поток сохраняется, то напряженность магнитного поля должна увеличиваться примерно в  $10^{10}$  раз и можно ожидать, что поверхностные поля по порядку величины будут достигать по крайней мере  $10^6$  *мл* ( $=10^{10}$  *гс*) или даже  $10^9$  *мл*, если первоначальная звезда была магнитной.

Если магнитная ось совпадает с осью вращения, конфигурация должна обладать осевой симметрией и мы не смогли бы принимать никаких импульсов. Это означает, что центральным телом пульсара должен быть наклонный ротатор, т. е. нейтронная звезда, магнитная ось которой не совпадает с осью вращения. Существуют некоторые доказательства, что в случае пульсара PSR 0531 + 21 угол между этими осями равен  $90^\circ$ . Интересно отметить, что такой же угол между магнитной осью и осью вращения был обнаружен у многих магнитных переменных звезд. Наклонный ротатор будет терять энергию, поскольку вращающий магнитный момент должен испускать электромагнитное излучение. Из теории мы знаем, что такая система будет терять энергию со скоростью  $dE/dt$ , равной

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{32\pi^2}{3c^2} \frac{m^2}{P^4}, \quad (5)$$

где  $m$  — компонента магнитного диполя, перпендикулярная оси вращения. Вместе с тем мы знаем, что увеличение периода пульсара должно приводить к потере им вращательной энергии со скоростью

$$\frac{dE_{\text{rot}}}{dt} = -\frac{4\pi^2 I^2 dP}{P^3 dt}, \quad (6)$$

где  $I$  — момент инерции нейтронной звезды. Положим  $m \sim B_{\text{max}} R^3$ , где  $B_{\text{max}}$  — максимальное значение магнитного поля на поверхности пульсара,  $R$  — радиус нейтронной звезды, а  $I \sim MR^2$ , где  $M$  — масса нейтронной звезды. Если теперь приравнять  $dE/dt$  к  $dE_{\text{rot}}/dt$ , т. е. предположить, что нейтронная звезда замедляется в результате ее электромагнитного излучения, мы найдем, что

$$B_{\text{max}} \sim 10^{15} \sqrt{\frac{P}{dP/dt}} \text{ мл},$$

где  $P$  измеряется в секундах. Поскольку типичное значение  $dP/dt$  равно  $10^{-15}$ ,  $B_{\text{max}}$  по порядку величины примерно лежит в пределах от  $10^7$  до  $10^8$  *мл*.

Некоторая часть вращательной энергии должна переходить в радиоизлучение. Из данных наблюдений следует, что обычно эта часть составляет примерно  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  всей вращательной энергии. Вероятно, к этим данным нужно было бы относиться с некоторой осторожностью, поскольку

для определения испускаемой пульсаром радиомощности нужно знать расстояние до пульсара, а точность определения этого расстояния может оказаться ошибочной даже на порядок величины. Если на мгновение предположить, что упомянутая доля энергии, переходящая в радиоизлучение, постоянна (по данным наблюдений нет никакой корреляции между ней и, скажем, периодом пульсара), то получается, что медленные пульсары и (или) пульсары с низким значением  $V_{\max}$  вряд ли можно наблюдать, хотя они, возможно, и существуют. Это обстоятельство может объяснить резкое падение числа пульсаров с периодом, большим 2 сек. Интересно отметить, что согласно данным Джодрелл-Бэнк о  $dP/dt$  из 68 имеющихся в соответствующем списке пульсаров у 60 пульсаров значения  $P/(dP/dt)$  лежат между  $10^{-16}$  и  $10^{-13}$  сек, откуда следует, что величина  $V_{\max}$  лежит между  $10^7$  и  $3 \cdot 10^8$  м. Для трех пульсаров отношение  $P/(dP/dt)$  лежит между  $10^{-17}$  и  $10^{-16}$  сек, а у одного оно равно  $10^{-18}$  сек. Этот последний пульсар PSR 1952 + 29 — пульсар с наибольшим значением  $\tau$  (см. рис. 3). Может быть, не случайно, что из четырех пульсаров со значениями  $P/(dP/dt)$ , большими  $10^{-3}$  сек, у трех эта величина лишь слегка превышает указанные значения и из этих трех два имеют длинные периоды, равные 2,1 сек (пятый из наиболее медленных пульсаров PSR 2002 + 31) и 3,7 сек (самый медленный пульсар PSR 0525 + 21); у третьего пульсара (PSR 1727—47) период средний (0,83 сек). Самое большое значение  $P/(dP/dt)$ , равное  $4 \cdot 10^{-13}$ , имеет пульсар PSR 0153 + 61, являющийся вторым из наиболее медленных пульсаров, в то время как у четвертого из этих медленных пульсаров PSR 2045—16 значение  $P/(dP/dt)$  также одно из наибольших. По-видимому, чтобы медленные пульсары были «видны», они должны обладать большим магнитным моментом; пульсары с  $V_{\max}$ , меньшие примерно  $10^7$  м, если они вообще существуют, по-видимому, не должны быть видны.

Теперь кратко остановимся на проблеме механизма излучения. Рассмотрим сначала вопрос о том, имеет ли нейтронная звезда атмосферу. Первоначально полагали, что огромные гравитационные силы на поверхности нейтронной звезды должны были бы мешать существованию атмосферы со сколь либо заметной высотой. Действительно, при температурах порядка  $10^6$  К приведенная высота атмосферы протонов должна быть порядка 1 см, и даже для электронов она будет достигать лишь примерно 10 м. Однако вращающееся магнитное поле создает большую электрическую силу, действующую на каждую заряженную частицу, и отношение этой силы к гравитационной при вращающемся с периодом около 1 сек магнитном поле порядка  $10^8$  м должно быть равно примерно  $10^8$ . Такое электрическое поле будет поддерживать заряженную атмосферу с концентрацией порядка  $10^{16}$  м<sup>-3</sup> (см. Гольдрейх и Джулиан<sup>5</sup>). Поле будет также ускорять частицы, так что, вероятно, должны возникать пучки частиц, проходящих через магнитосферу. Процессы, которые могут протекать в этой магнитосфере, очень сложны, и мы не будем их подробно описывать. Но прежде чем вообще начать разговор о них, нужно выяснить, в каком месте возникает излучение. Многие полагали, что излучение должно возникать довольно далеко от поверхности нейтронной звезды, и в поддержку своей точки зрения приводили следующие доводы: если частицы вращаются вместе с нейтронной звездой на таком расстоянии  $d$  от оси вращения, что  $2\pi d/P$  почти достигает скорости света, то должна возникнуть релятивистски обусловленная направленность излучения. Против этого можно возразить, что в этом случае можно было бы ожидать, что все пульсары должны иметь практически одинаковую форму окна импульса, поскольку любые особенности строения самой нейтронной звезды уже не будут заметны при  $d \gg R$ , что имеет место вблизи светового

цилиндра, т. е. цилиндра, для которого  $d = Pc/2\pi$ . Поскольку наблюдают много пульсаров с очень сложными импульсными окнами, которые служат характеристикой каждого пульсара и сохраняют свою форму в течение всего времени наблюдения пульсаров (т. е. для числа периодов от  $10^7$  до  $10^9$ ), то по крайней мере для этих пульсаров нужно искать механизмы излучения, действующие вблизи поверхности нейтронной звезды.

Из наблюдаемых потоков радиоизлучения, расстояний от нас до пульсаров и размеров излучающей области, определяемой по размеру импульса, следует, что интенсивность радиоизлучения нельзя объяснить некогерентным тепловым излучением, т. е. необходим какой-либо тип когерентного механизма. В принципе возможны два типа когерентных механизмов: так называемые антенные механизмы, для которых когерентность обеспечивается группировкой (образованием сгустков) частиц в пучках, и мазерные механизмы, для которых излучение не поглощается, а усиливается. Очень сомнительно, чтобы образование сгустков частиц являлось процессом достаточно стабильным, и, например, Гинзбург, Железняков и др.<sup>6, 7</sup> приводили, как нам кажется, убедительные соображения против антенных механизмов излучения. Что же касается мазерных механизмов, то многие авторы пытались объяснить радиоизлучение путем неустойчивости пучков в плазме магнитосферы и трансформаций продольных плазменных волн в поперечные электромагнитные волны. Трудности всех этих теорий заключаются в том, что легко получить излучение на оптических и рентгеновских частотах, но пульсары излучают радиоволны. Гинзбург отметил, что нужно во всяком случае рассматривать релятивистскую плазму, и что все выводы нужно пересмотреть именно для этого случая. На такой пессимистической ноте мы должны распрощаться с общим обсуждением пульсаров и перейти к двойному пульсару PSR 1913 + 16.

#### 4. ДВОЙНОЙ ПУЛЬСАР PSR 1913 + 16

Систематический обзор небесной сферы, который выполнили Халс и Тейлор<sup>2</sup> на Аресибской обсерватории с целью отыскания новых пульсаров, привел в июле 1974 г. к обнаружению пульсара с очень коротким периодом, равным 59 мсек. Пытаясь измерить этот период с точностью до 1 мксек, авторы обнаружили не только ежедневные его изменения, составляющие до 80 мксек, но и изменения до 8 мксек за несколько минут. До этого момента наибольшие наблюдаемые секулярные изменения составляли примерно 10 мксек в год, а нерегулярные изменения были еще меньше на несколько порядков величины. Вскоре стало очевидно, что естественное объяснение колебаний периода пульсара PSR 1913 + 16 — орбитальное движение пульсара. Это значит, что в некоторой двойной системе одна из звезд является пульсаром. Как мы уже отметили, период его равен лишь 59 мсек, отношение  $dP/dt$ , по-видимому, меньше  $10^{-13}$ . Основным интересом представляют параметры его орбитального движения. Орбитальный период  $T$  равен примерно 8 часам (2790 сек), эксцентриситет  $e = 0,61$ , проекция большой полуоси  $a_p \sin i = 1,00R_\odot$  ( $1R_\odot$  — радиус Солнца,  $a_p$  — большая полуось орбиты обращения пульсара вокруг центра масс и  $i$  — наклонение орбиты к картинной плоскости), функция масс

$$\chi \equiv \frac{(m_c \sin i)^3}{(m_c + m_p)^2}$$

( $m_p$  и  $m_c$  — массы пульсара и его компаньона соответственно). Здесь использован третий закон Кеплера, связывающий большую полуось

орбиты пульсара, период его оборота, а также  $m_c$  и  $m_p$ , равные  $0,13M_\odot$  ( $1M_\odot$  — масса Солнца). Долгота периастра, т. е. угол между восходящим узлом и периастром, равна  $179^\circ$  и его прецессия  $d\omega/dt$  составляет  $3,6^\circ \pm \pm 1,6^\circ$  в год. И наконец, радиальная скорость пульсара при его движении по орбите меняется от примерно  $+100$  км/сек до менее чем  $-300$  км/сек, что дает разность в  $400$  км/сек.

После появления в печати сообщения об открытии пульсара PSR 1913 + 16 было написано много статей, в которых обсуждаются последствия этого открытия, поскольку сразу же стало очевидным, как сейчас будет пояснено, что мы почти наверняка имеем дело с тесной двойной системой; обе компоненты этой системы являются компактными объектами, и поэтому можно наблюдать относительно большие релятивистские эффекты. Кроме этого, активно обсуждался вопрос о происхождении двойной системы, и мы кратко изложим возможный сценарий ее образования.

Прежде всего отметим, что радиальная скорость по порядку величины равна  $0,001 c$  ( $c$  — скорость света), откуда следует, что угол  $i$  не может быть очень мал и  $\sin i$  должен быть порядка единицы. Тогда из величины функции масс находим, что отношение  $m_p/m_c$  должно быть порядка единицы. Мы можем, однако, пойти еще дальше, а именно исключить фактически возможность того, что партнер пульсара — звезда главной последовательности. Основанием для этого служит величина прецессии долготы периастра. Долгота периастра меняется в основном по двум причинам: в силу приливных и релятивистских эффектов. Приливные эффекты пропорциональны  $(R_c/a)^5$ , и для звезды главной последовательности, у которой радиус  $R_c$  должен быть сравним с  $a$ , это должно привести к значению  $d\omega/dt$  порядка  $10^4$  градусов в год. Следовательно, мы можем исключить из нашего рассмотрения звезду главной последовательности. Если компаньон является компактной звездой, прецессия долготы периастра определяется выражением

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{6\pi G (m_p + m_c)}{c^2 a (1 - e^2)} \text{ за 1 оборот,} \quad (7)$$

или

$$\frac{d\omega}{dt} = 2 \left( \frac{m_c + m_p}{M_\odot} \right)^{2/3} \text{ градусов в год,} \quad (8)$$

что дает

$$m_c + m_p \sim 2M_\odot.$$

Можно, между прочим, отметить, что мера дисперсии для данного пульсара изменяется меньше чем на одну сотую часть, вследствие чего обмен массой между пульсаром и его партнером должен быть пренебрежимо малым.

Итак, мы имеем дело с двойной системой, состоящей из двух компактных звезд, что открывает путь к множеству волнующих возможностей, некоторые из которых мы здесь обсудим. Нам предоставлена почти идеальная релятивистская лаборатория: точные часы, движущиеся с огромной скоростью по эксцентричной орбите в сильном гравитационном поле. Мы уже отметили релятивистское движение периастра. Обе величины  $(v_p/c)^2$  и  $Gm_p/c^2 r_p$  ( $v_p$  — орбитальная скорость пульсара и  $r_p$  — расстояние между пульсаром и его партнером) сильно меняются в течение каждого периода. Поэтому и релятивистский сдвиг Доплера, и гравитационное красное смещение должны приводить к вариациям  $\Delta P$  за период, равный, как сразу легко определить, примерно  $10^{-6} \cos \theta$  ( $\theta$  — истинная аномалия пульсара относительно центра масс). Если бы удалось измерить этот эффект, мы смогли бы определить отдельно  $m_c$ ,  $m_p$  и  $i$ . Гравита-

дионное излучение должно приводить к скорости движения орбитального периода порядка  $3 \cdot 10^{-5}$  сек/год, но Брумберг, Зельдович, Новиков и Шакура<sup>8</sup> оценили, что этот эффект может оказаться замаскированным аналогичным эффектом, возникающим в результате движения центра массы в гравитационном поле нашей Галактики. Спин-орбитальные и спин-спиновые взаимодействия, а также эффекты, связанные с мультипольными моментами распределения масс, слишком малы для наблюдений. Однако

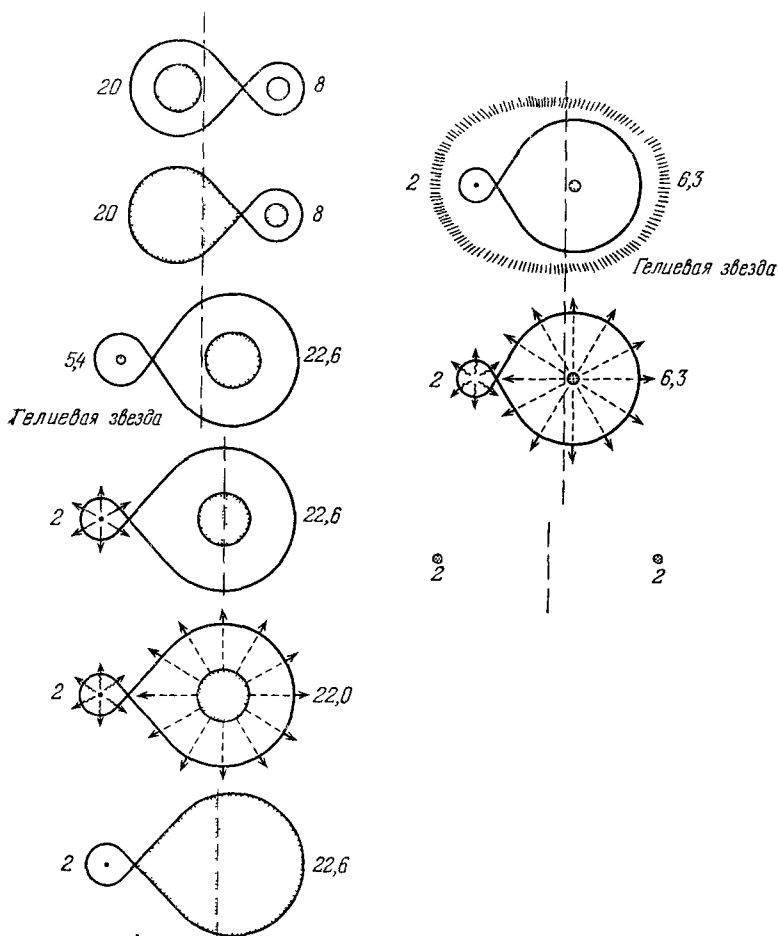


Рис. 7. Эволюция двойной системы с образованием пульсаров.

существует еще один эффект, имеющий весьма важные следствия: ось пульсара прецессирует со скоростью около  $2^\circ$  в год. Поэтому, если излучение пульсара имеет форму карандашного пучка, примерно через 10 лет мы потеряем пульсар из виду, и он снова появится приблизительно через два столетия. И, наконец, отметим, что если бы можно было независимым образом измерить достаточно большое количество эффектов, то прецессия долготы периастра в принципе предоставила бы нам возможность различать разные пост-ньютоновские теории гравитации.

Заметим, что, если вторая звезда двойной системы также была бы пульсаром и если можно было бы наблюдать ее импульсы, мы получили бы эквивалент спектрально-двойной с двумя линиями, для которой можно

непосредственно определять отношение масс  $m_c/m_p$ . Однако мера дисперсии для PSR 1913 + 16 весьма велика и вполне вероятно, что, даже если вторая звезда и является пульсаром, мы не смогли бы наблюдать его импульсы. В силу большого от нас расстояния, равного примерно 5 *кпс*, вдоль луча зрения должно иметь место большое оптическое поглощение, и, по-видимому, чрезвычайно сомнительна возможность наблюдения оптических импульсов, если бы они и имели место.

Скажем в заключение несколько слов об образовании двойного пульсара. Еще до открытия PSR 1913 + 16 утверждалось, что пульсары не могут быть компонентами двойных систем, поскольку приводящий к образованию пульсара взрыв сверхновой должен был бы разрушить систему. Однако теперь, после обнаружения PSR 1913 + 16, оказалось, что при определенном направлении разлета осколков взрыва может возникнуть наблюдаемая орбита. Недавно де Лур, де Греве и де Койпер<sup>9</sup> описали процесс образования двойного пульсара типа PSR 1913 + 16 из двойной системы, состоящей из двух звезд главной последовательности с массами  $20M_{\odot}$  и  $8M_{\odot}$  соответственно. Процесс эволюции протекает следующим образом (рис. 7). Первая стадия: две звезды главной последовательности с орбитальным периодом  $T = 4,5$  дня и с большой полуосью  $a = 35R_{\odot}$ . Вторая стадия: возникает перетекание массы, и примерно через 6 миллионов лет заполняется полость Роша. Третья стадия: примерно еще через 30 000 лет система состоит из гелиевой звезды с массой  $5,4M_{\odot}$  и звезды с массой  $22,6M_{\odot}$ ;  $T = 11$  дней,  $a = 62R_{\odot}$ . Это двойная система Вольф — Райе. Четвертая стадия: полмиллиона лет спустя гелиевая звезда взрывается, и ее остатком является молодая нейтронная звезда (с массой  $2M_{\odot}$ ),  $T = 12$  дней,  $a = 69R_{\odot}$ . Пятая стадия: еще 4,5 миллионов лет спустя вторая звезда достигает конца стадии выгорания водорода в ее сердцевине. Это сверхгигант ОВ с сильным звездным ветром, приводящим к мощному рентгеновскому излучению от нейтронной звезды, и вся система напоминает Cir X-1 (Циркуль X-1). Шестая стадия: вскоре (20 000 лет спустя) заполняется вторая полость Роша, и вещество начинает покидать систему. Седьмая стадия: вторично происходит потеря массы и это продолжается примерно 30 000 лет; в конце стадии  $T = 1,4$  часа и  $a = 1,4R_{\odot}$ . Вторая звезда является теперь гелиевой звездой с массой, равной  $6,3M_{\odot}$ . Гелиевая звезда вместе с нейтронной видны как одиночная звезда Вольф — Райе. Восьмая стадия: второй раз появляется рентгеновское излучение с ультракоротким периодом рентгеновской двойной системы, такой, как Cug X-3 (Лебедь X-3). Конечная стадия: спустя примерно миллион лет взрывается вторая звезда с образованием второго пульсара с массой  $\sim 2M_{\odot}$ . Эксцентриситет орбиты весьма велик ( $\sim 0,58$ ),  $T = 8$  часов и  $a = 3R_{\odot}$ .

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. R u d d e r m a n, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. J. 10, 427 (1972).
2. R. A. H u l s e, J. H. T e y l o r, Astrophys. J. 195, L51 (1975).
3. G. R. H u g u e n i n, R. N. M a n c h e s t e r, J. H. T e y l o r, ibid. 169, 97 (1971).
4. A. G. L y n e, R. T. R i t c h i n g s, F. G. S m i t h, Mon. Not. RAS 171, 579 (1975).
5. J. E. G u n n, J. P. O s t r i k e r, Astrophys. J. 165, 523 (1970).
6. V. L. G i n z b u r g, in: Highlights of Astronomy, v. 2, Dordrecht, D. Reidel, 1975, p. 20; то же: УФН 103, 393 (1971).
7. V. L. G i n z b u r g, V. V. Z h e l e z n y a k o v, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. 13, 511 (1975).
8. В. А. Б р у м б е р г, Я. Б. З е л ь д о в и ч, И. Д. Н о в и к о в, Н. И. Ш а к у р а, Письма Астрон. ж. 1, 5 (1975).

9. C. de L o o r, J. P. de G r e v e, J. P. de G u y p e r, *Astrophys. and Space Sci.* 36, 219 (1975).  
H. Y. C h i u, *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 82, 487 (1970).  
A. H e w i s h, цит. в <sup>6</sup> сборник, p. 3.  
F. G. S m i t h, *Rept. Progr. Phys.* 35, 339 (1972).

ЛИТЕРАТУРА О ДВОЙНОМ ПУЛЬСАРЕ PSR 1913 + 16 (гл. 4)

- A. R. M a s t e r s, D. H. R o b e r t s, *Astrophys. J.* 195, L107 (1975).  
K. B r e c h e r, *ibid.*, p. L113.  
L. W. E s p o s i t o, E. R. H a r r i s o n, *ibid.* 196, L1 (1975).  
C. M. W i l l, *ibid.*, p. L3.  
K. N o r d t v e d t, *ibid.* 202, 248.  
R. F. W e b b n i k, *Astron. and Astrophys.* 41, 1 (1975).