

ОСНОВНЫЕ НАБЛЮДАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ. КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

1. ВВЕДЕНИЕ. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Источники периодического импульсного излучения – пульсары были открыты в Кембридже (Великобритания) в известной мере случайно, во время подготовки программы исследований по межпланетным мерцаниям в радиодиапазоне на частоте 81,5 МГц [1]. Первый радиопульсар PSR B1919+21¹ излучал регулярные импульсы с довольно стабильным периодом $P = 1,337$ с (рис. 1) [2]. К настоящему времени известно более 1300 радиопульсаров [3]. Перечислим кратко основные наблюдаемые характеристики этих объектов.

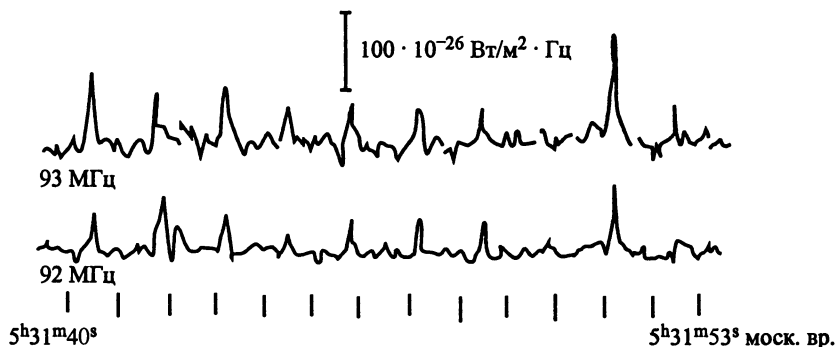


Рис. 1. Запись радиоизлучения пульсара CP 1919, сделанная 26.04.68 на радиотелескопе ДКР-1000 ФИАН

¹ В современных обозначениях пульсаров указывается их прямое восхождение и склонение, приведённые к эпохе 1950 г. (B) или 2000 г. (J).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАРОВ

Периоды. Основным параметром пульсаров можно считать период P – время между двумя последовательными импульсами излучения. Значения известных периодов заключены в интервале от 1,56 мс до 8,5 с, а их распределение имеет вид, представленный на рис. 2 [3]. Это распределение двухкомпонентно: первый максимум на 4 мс соответствует миллисекундным пульсарам,

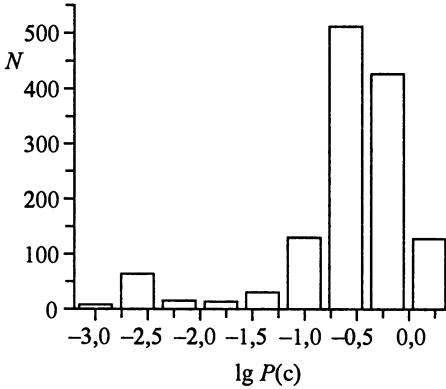


Рис. 2. Распределение 1330 пульсаров по периодам.

второй на 0,63 с – «нормальным» пульсарам.

Производные периода.

У подавляющего большинства пульсаров период монотонно увеличивается со временем² с типичным значением производной периода $dP/dt \sim 10^{-15}$ с/с для объектов с $P \sim 1$ с и $dP/dt \sim 10^{-19}$ с/с у миллисекундных пульсаров. В ряде объектов (например, PSR B0531+21 и PSR B0833-45) наблюдаются резкие скачки периода ($\Delta P/P \sim 10^{-9}$ +

+ 10^{-6}) с последующей релаксацией к прежнему монотонному ходу.

Формы импульсов. Индивидуальные импульсы радиоизлучения у данного пульсара могут быть совершенно не похожими один на другой. Однако после усреднения приблизительно 1000 таких импульсов формируется средний профиль, который остается неизменным при последующих усреднениях и является своеобразным портретом каждого пульсара. Ширины средних импульсов W , как правило, составляют от 0,01 до 0,1 P_1 ³. Однако у некоторых пульсаров (например, у PSR B0540-69, PSR B0826-34, PSR B1620-26, PSR B1659-60, PSRB1834-10, PSR B2127+11D) излучение наблюдается в течение значительной части периода. Средний импульс может быть простым (однокомпонентным), двухкомпонентным или состоять из нескольких компонентов (рис. 3) [4]. Их относительные интенсивности и ширина зависят

² Обнаруженные в последнее время у нескольких радиопулсаров уменьшения периодов связаны с эффектом Доплера вследствие их движения в шаровых скоплениях, а не с процессами в самом пульсаре.

³ Далее обозначается буквой P без индекса.

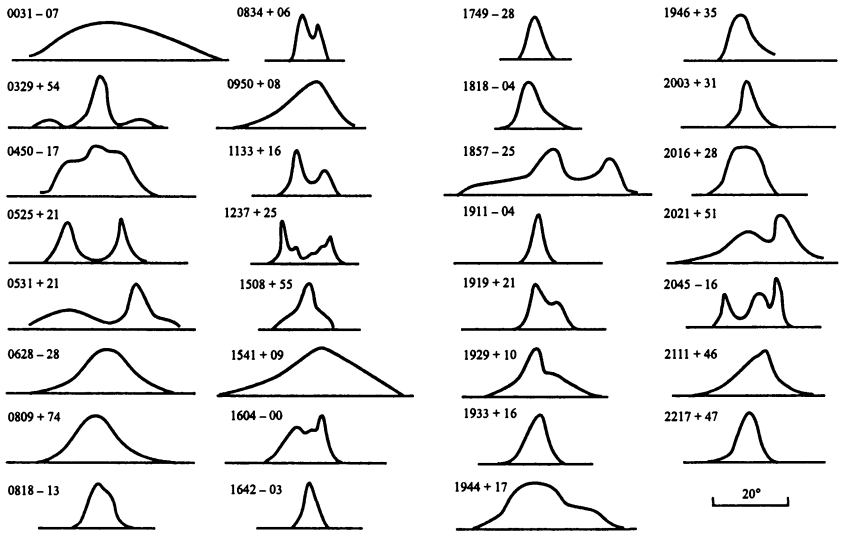


Рис. 3. Профили средних импульсов 31 пульсара в одном угловом масштабе (Джодрелл Бэнк, 408 МГц) [4]

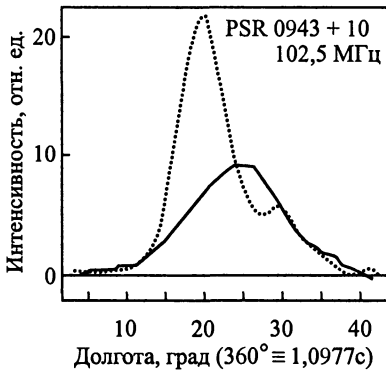


Рис. 4. Изменение формы среднего импульса в пульсаре PSR B0943+10 [5]

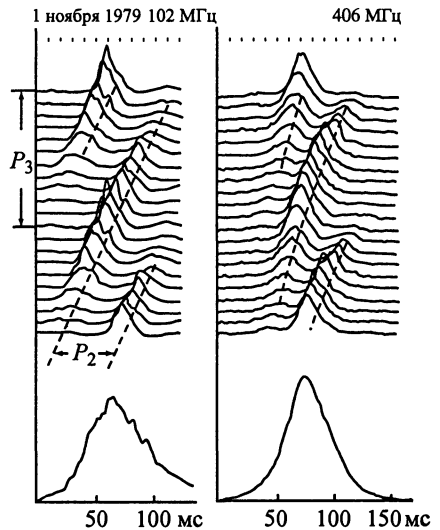


Рис. 5. Дрейф субимпульсов в среднем профиле пульсара PSR B0809+74 на двух частотах [6]

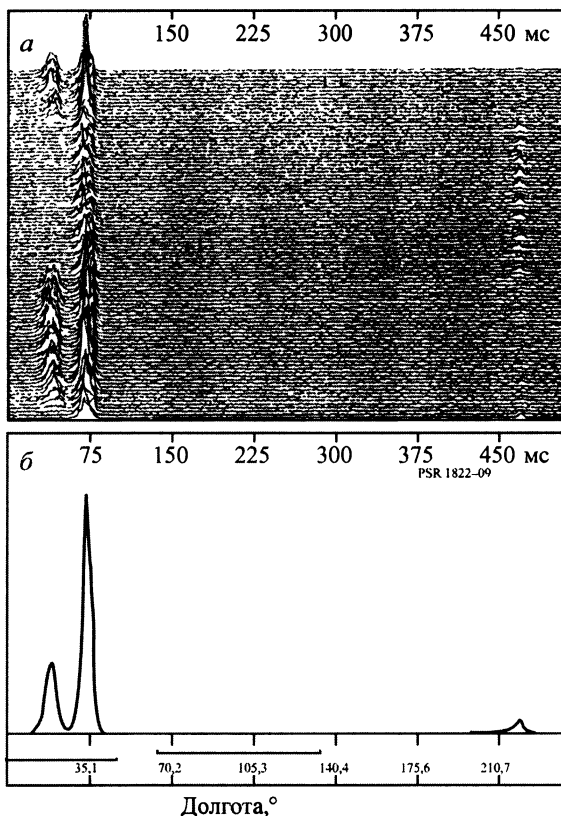


Рис. 6. Последовательность 100 средних импульсов PSR B1822–09 на частоте 1408 МГц, каждый из которых получен суммированием 10 индивидуальных импульсов, (а) и интегральный профиль, полученный интегрированием 7360 импульсов (б)

от частоты. У некоторых пульсаров может быть две (PSR B1237+25) или даже четыре (PSR B0329+54) устойчивые моды среднего профиля (рис. 4) [5]. В ряде объектов наблюдается дрейф компонентов (субимпульсов) по долготе с периодом P_3 и с возвращением через некоторое время (период P_2) к исходной фазе (рис. 5) [6].

Интересной особенностью нескольких пульсаров является наличие у них между двумя последовательными импульсами дополнительной детали – интеримпульса, обычно менее интенсивного, чем главный импульс (рис. 6) [7].

Микроструктура. По мере увеличения временного разрешения аппаратуры было установлено, что в некоторых пуль-

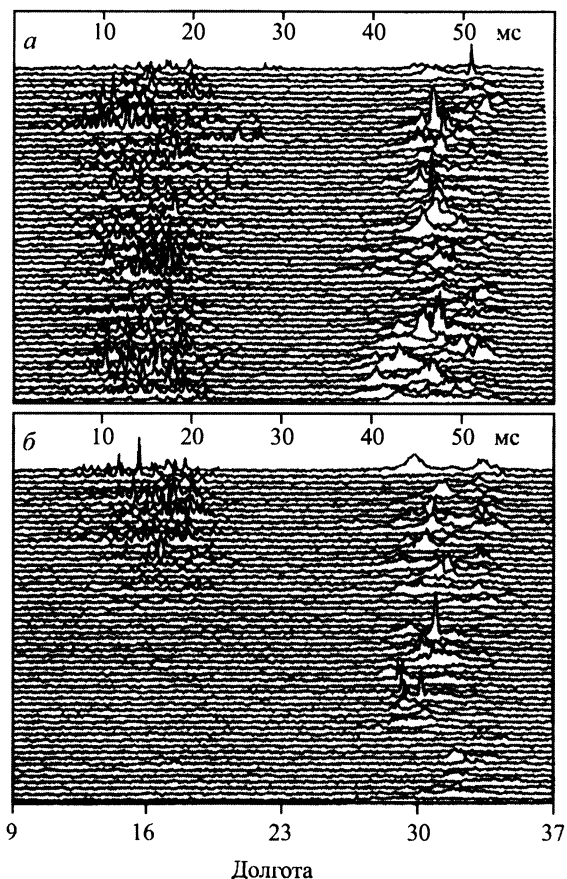


Рис. 7. Две последовательности 55 индивидуальных импульсов PSR B1822–09 на частоте 1420 МГц с разрешением 50 мкс

сарах субимпульсы имеют сложную структуру – микроструктуру с характерным масштабом отдельных деталей до 1 мкс (рис. 7) [7]. Хэнкинс с соавторами [8] обнаружил в гигантских импульсах PSR B0531+21 более мелкие (наносекундные) детали. Вопрос о том, каков наименьший временной масштаб, в настоящее время остаётся открытым. Его решение представляется очень важным, поскольку минимальные частотно-временные структуры характеризуют механизм излучения и свойства элементарного излучателя в пульсарах.

Поляризация. Для выяснения природы излучения пульсаров также очень существенную информацию дают поляризационные измерения. Оказалось, что наблюдаемое радиоизлучение у боль-

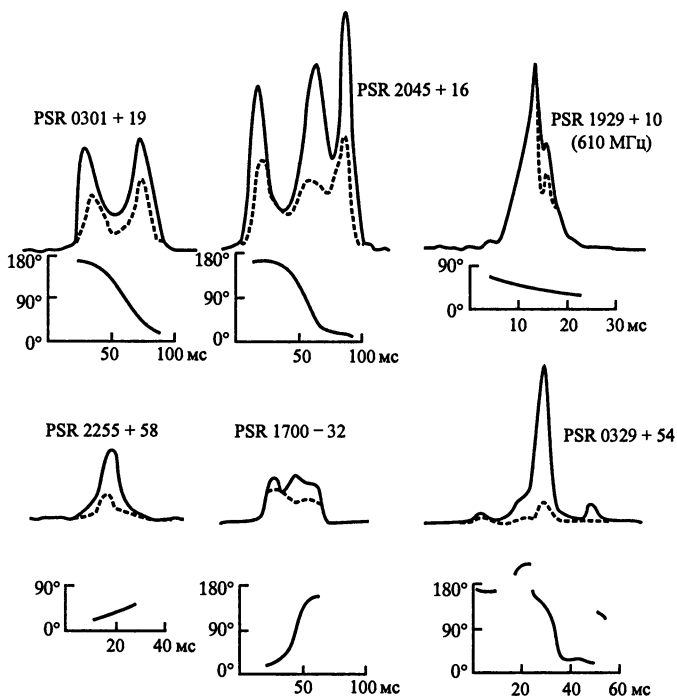


Рис. 8. Поляризация в средних импульсах для 6 пульсаров. Штриховая линия соответствует линейно поляризованному компоненту, а кривые под профилями показывают ход позиционного угла (Джодрелл Бэнк, частоты 408 и 610 МГц) [4]

шей части пульсаров сильно поляризовано. Так, у PSR B0833–45 и PSR B0950+08 степень линейной поляризации близка к 100% [9–10]. Позиционный угол в пределах импульса у многих объектов изменяется монотонно (рис. 8), но в некоторых пульсарах наблюдаются резкие скачки этого угла [4]. Изменение поляризационных параметров вдоль среднего профиля (так же, как и сам средний профиль) является характеристикой данного пульсара. Зависимости хода позиционного угла и степени линейной поляризации с частотой различны у разных пульсаров [12] и в настоящее время детально не изучены. То же касается и круговой поляризации, которая для многих пульсаров не превышает нескольких процентов, однако у отдельных источников может достигать нескольких десятков процентов [13–14].

РАССТОЯНИЯ ДО ПУЛЬСАРОВ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПУЛЬСАРОВ В ГАЛАКТИКЕ

Для понимания происхождения, природы и эволюции космических объектов необходимо знать расстояния до каждого из них. В частности, при вычислении важнейшей во многих отношениях величины светимости используются значения расстояния (см. следующий раздел). Для выяснения картины распределения источников в пространстве также не обойтись без определения расстояний. Поэтому в течение всего времени исследования пульсаров методам оценки удалённости этих объектов от наблюдателя и их расположения в Галактике уделялось самое пристальное внимание.

Определение расстояний до пульсаров

Оценка расстояния по мере дисперсии. Импульсный характер излучения пульсара позволяет оценить расстояние до него по различию времени прихода импульса Δt на двух частотах. Это различие обусловлено зависимостью групповой скорости распространения волны в межзвёздной среде от её частоты ω

$$v_g = [1 - \omega_p^2 / \omega^2]^{1/2} c, \quad (1)$$

где $\omega_p = (4\pi n_e e^2 / m_e)^{1/2}$ – плазменная частота среды. Величина Δt задаётся выражением

$$\Delta t = 2\pi e^2 n_e l (1/\omega_1^2 - 1/\omega_2^2) / m_e c, \quad (2)$$

из которого по наблюдениям определяется величина меры дисперсии

$$DM = \int n_e dl. \quad (3)$$

Здесь и далее e – заряд электрона, m_e – его масса, n_e – концентрация электронов.

Если известно среднее значение электронной концентрации на луче зрения $\langle n_e \rangle$ (принимаемое обычно равным $0,03 \text{ см}^{-3}$), то по измеренной мере дисперсии легко вычислить расстояние до пульсара

$$d = DM / \langle n_e \rangle. \quad (4)$$

Однако для более точных вычислений расстояния d по этому методу используют всю совокупность имеющихся наблюдательных данных о распределении электронной концентрации в Галактике [15].

Анализ поглощения в линии $\lambda = 21$ см. Вследствие дифференциального вращения Галактики скорость источника вдоль луча зрения зависит от его расстояния до галактического центра. При известной модели дифференциального вращения расстояние до источника может быть получено по значению предельной скорости из анализа профиля линии поглощения нейтрального водорода $\lambda = 21$ см в спектре этого источника [16–19]. Значительные погрешности такого метода связаны с наличием peculiarных скоростей у облаков поглощающего газа и с их неоднородной плотностью. Как показывают результаты проведённых исследований (см., например, [16]), измеренные по линии $\lambda = 21$ см расстояния могут отличаться в несколько раз от оценок по мере дисперсии. Однако в целом ряде случаев эти значения очень близки друг к другу.

Другие методы. Измерение параллакса. Для двух пульсаров (PSR B0950+08 и PSR B1929+10) с помощью интерферометрических наблюдений удалось измерить годичный параллакс [20–22], причём определённое по параллаксу расстояние до этих пульсаров очень близко к оценкам по мере дисперсии.

Определение расстояния по межзвёздному рассеянию. В тех случаях, когда положение пульсара на небесной сфере оказывается достаточно близким к Солнцу и наблюдаются его мерцания на неоднородностях межпланетной плазмы, можно вычислить расстояние до источника по величине его углового размера, который определяется рассеянием излучения в межзвёздной среде [23].

Использование связи пульсара с остатком сверхновой. В случае, когда пульсар находится в остатке сверхновой, расстояние до него равно расстоянию до этого остатка и может быть определено методами, разработанными для них [24].

Пульсары в других галактиках. С достаточно большой точностью можно будет определить расстояние до пульсара при его обнаружении в других галактиках, например, в Магеллановых Облаках [25]. Поиск пульсаров в более далёких галактиках станет, по-видимому, возможным лишь при существенном увеличении чувствительности радиометров.

Распределение пульсаров в Галактике

Измеренные расстояния позволяют обратиться к задаче распределения пульсаров в Галактике. Соответствующая функция распределения зависит от трёх переменных: расстояния от Центра Галактики R , высоты над плоскостью Галактики (z -координаты) и светимости L . Обычно считается, что три функции $r(z)$, $f(R)$ и $\Phi(L)$ независимы, и общая функция распределения представляет собой их произведение.

Мы не будем здесь подробно описывать процедуру получения функций распределения и учёта искажений эффектами селекции, а приведём лишь конечные результаты их анализа. Оказалось, что число пульсаров уменьшается экспоненциально с ростом z при характерном масштабе высоты порядка 400 пк [15]. В то же время для массивных звёзд, из которых, как считается, образуются пульсары, характерна высота менее 100 пк. Единственным объяснением такого различия может быть наличие у пульсаров большой составляющей скорости, перпендикулярной плоскости Галактики. Действительно, в работах [26–27] показано, что по измерению собственных движений пульсаров их скорости направлены от плоскости и имеют квазимаквелловское распределение с дисперсией z -компоненты ~ 100 км/с. Знание z -координаты и принятие в качестве среднего значения скорости порядка 100 км/с позволяет оценить кинематический возраст пульсара, который в среднем оказывается равным ~ 10 млн лет.

Функция распределения пульсаров по галактоцентрическим расстояниям $f(R)$ показывает наличие максимума в районе $R \sim 4+6$ кпк и падение в направлении Антицентра [15]. Наблюдаемое распределение пульсаров по R аналогично распределению сверхновых [28], остатков сверхновых [29] и молекулярных облаков [30], что усиливает вывод о связи пульсаров со сверхновыми и их прародителями из населения I.

Распределение по светимостям рассматривается в следующем разделе, посвящённом в основном наблюдаемым спектрам радиоизлучения пульсаров.

2. СПЕКТРЫ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ. СВЕТИМОСТЬ

Важнейшую информацию о природе любого источника и, в частности, о механизме его излучения содержит наблюдаемый энергетический спектр, т.е. распределение излучаемой энергии по частотам. Что касается радиопульсаров, то лишь у 41 из более 1300 объектов, вошедших в известные каталоги, обнаружено