

# АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

# АСТРОФИЗИКА

ТОМ 15

АВГУСТ, 1979

ВЫПУСК 3

УДК 523.841

ОБЗОРЫ

## ПУЛЬСАРЫ

(Обзор наблюдательных данных)

М. А. МНАЦКАНЯН

Дается краткий обзор основных наблюдательных данных по пульсарам. Обсуждается вопрос о возрастах пульсаров в связи с их эволюцией.

1. *Введение.* Пожалуй, ни одно астрофизическое явление не послужило объектом столь интенсивных исследований за последнее десятилетие, как пульсары. Уникальность явления пульсирующих радиисточников состоит в импульсном характере их излучения с необычайно коротким — порядка секунды и меньше, периодом пульсаций, обладающим исключительно высокой стабильностью, достигающей зачастую до  $10^{-8}$ . Эти неожиданные для астрофизиков свойства излучения пульсаров стимулировали систематические наблюдения, направленные на разностороннее изучение их характеристик, и заинтриговали теоретиков возможностью наконец-то встретиться «наяву» с гипотетическими нейтронными звездами.

Важность исследования пульсаров стала ясна сразу же с их обнаружением. И хотя в физике явления пульсара многое до сих пор остается непонятым, определенные представления об этих объектах сложились уже в первые годы их открытия. Правда, они основывались на сравнительно малом количестве известных в то время пульсаров, а на сегодняшний день их число значительно возросло, тем не менее, эти представления существенным изменениям не подверглись, разве лишь получили статистически более весомое подтверждение. Их изложение дается в оригинальных обзорах Хьюиша [1], гер-Хаара [2], Тейлора и Манчестера [3] и других [4—8].

К настоящему времени по пульсарам опубликовано более 500 научных статей и сообщений. Они посвящены поискам пульсаров и технике их наблюдений, изучению характеристик излучения, его спектральных и поляризационных свойств. Будучи объектами нашей Галактики, пульсары предоставляют прекрасные возможности для изучения структуры и свойств межзвездной среды. Работы по построению теории пульсаров играют серьезную эвристическую роль в познании их природы.

В первых двух частях настоящего обзора мы изложим основные наблюдательные данные, относящиеся к индивидуальным характеристикам пульсаров и свойствам, присущим им как членам нашей Галактики. Вопросы механизма излучения, моделей и теории пульсаров мы затрагивать не будем. Третью часть мы посвятим вопросу о возрастах пульсаров и, в частности, тому, с какими начальными периодами «рождаются» пульсары. Этот анализ внесет некоторую ясность в оценки истинных возрастов пульсаров, важные для понимания их эволюции.

2. *Открытие пульсаров.* Первые пульсары (1919+21 и 0834+06, 0950+08, 1133+16) были обнаружены в 1967 г. в Кембридже Ж. Белл и А. Хьюншем<sup>\*</sup> при систематических наблюдениях межпланетных мерцаний [9—11]. Затем в поиски пульсаров включились крупнейшие радиоастрономические обсерватории мира. В течение года были обнаружены еще 6 пульсаров, к 1970 г. было открыто 50, а к 1975 г. стало известно около 150 пульсаров. Обзор наиболее полных и точных данных об этих пульсарах и ссылки на соответствующие источники приводятся в [12].

К концу 1978 г. Тейлор, Манчестер и др. [18] опубликовали список новых 155 пульсаров, а чуть позже поступило сообщение [19] об открытии еще 17 новых пульсаров. Таким образом, полное количество известных к настоящему времени пульсаров составляет 321. Подавляющее большинство их было открыто при обзорных поисках на обсерваториях Молонгло (Австралия) [13, 18, 19], Джодрел Бэнк [14, 15] и Аресибо [16, 17] (США). Эти обзоры охватывают все южное и значительную часть северной половины неба ( $l < 20^\circ$ ).

Как сообщается в [18], среди зарегистрированных 224 пульсаров 69 оказались ранее известными. Если считать процесс обнаружения пульсара случайным (особенности излучения пульсара допускают отличную от нуля вероятность упустить его обнаружение)<sup>\*\*</sup>, то по данным о количестве ранее известных пульсаров  $n_1 \sim 150$ , вновь зарегистрированных  $n_2 = 224$  и повторно обнаруженных  $n_3 = 69$  можно оценить полное коли-

\* Нобелевская премия 1974 г. была присуждена М. Райлу за апертурный синтез и А. Хьюншу за открытие пульсаров.

\*\* Согласно тому же сообщению [18], 30 известных пульсаров в обозреваемой области неба не были зарегистрированы.

чество  $N$  пульсаров, которые могут быть обнаружены при нынешних условиях наблюдений (технике и обозреваемой области неба) по простой формуле

$$N = n_1 n_2 / n_{12} \approx 490. \quad (1)$$

Согласно сообщению [19],  $n_1 \approx 300$ ,  $n_2 = 43$ ,  $n_{12} = 26$ , и мы получаем ту же оценку  $N \approx 500$ . Следовательно, в ближайшие годы можно ожидать открытие примерно 150–200 новых пульсаров.

### 1. Индивидуальные характеристики пульсаров

3. *Импульсы и их стабильность.* Излучение пульсаров носит импульсный характер с максимумами, повторяющимися регулярно через равные промежутки времени, называемые периодом пульсара. У некоторых пульсаров в интервале между двумя основными импульсами, нередко посередине, наблюдается более слабый промежуточный импульс.

Потоки в импульсах в десятки, иногда сотни раз превышают поток в промежутке между ними, так что средний поток в течение длительного времени обычно порядка фонового. Например, у пульсара 1919+21, открытого первым [9], наиболее мощные импульсы достигают  $2 \cdot 10^{-21}$  Вт/м<sup>2</sup>Гц, а средняя плотность потока равна  $10^{-26}$  Вт/м<sup>2</sup>Гц. Это значит, что пульсары являются чрезвычайно слабыми источниками — их средние потоки ниже чувствительности приемников, используемых для крупномасштабных обзоров неба [10].

Периоды пульсаров обладают исключительно высокой стабильностью. Так, например, у пульсара 1919+21 период измерен с точностью до нескольких единиц двенадцатого знака: 1.33730119227 с. Обычно стабильность периодов пульсаров порядка величин  $10^{-8}$ – $10^{-11}$ . Такая высокая точность повторения сигналов указывает на глобальный характер излучения пульсара, как целого [10].

4. *Ширина импульса и размеры пульсаров.* Длительность импульса почти у всех пульсаров составляет несколько процентов от всего периода, так что между шириной импульса и периодом устанавливается довольно четкая прямая корреляция. Характерная полуширина импульса — от нескольких до нескольких десятков мс. Исходя из ширины импульса можно сделать очень важное заключение о размерах пульсаров. Раз излучение пульсара носит глобальный характер, то в интервале времени  $W$ , равном ширине импульса, излучение должно быть зарегистрировано от разных частей источника, то есть свет должен успеть пройти расстояние  $r$  порядка размеров пульсара. Отсюда следует, что

$$r \approx W \cdot c, \quad (2)$$

где  $c$  не превышает скорости света в вакууме. Такие оценки (сверху) приводят к характерным размерам пульсаров от сотни до нескольких тысяч километров. Для пульсара 1919+21,  $W = 25$  мс и  $r \approx 5000$  км.

5. *Флуктуации амплитуды.* Амплитуды импульсов испытывают сильные изменения в течение дней, часов, минут и даже от импульса к импульсу. Например, у пульсара 1919+21 импульсы заметны в течение минуты-двух, после чего они «замирают» на две-три минуты. У пульсара 0943+10, открытого в Пущино [22, 23], эти замирания настолько продолжительны, что в течение месяца импульсы регистрировались всего несколько раз. Обычно замирания происходят внезапно, на несколько периодов, затем импульсы так же внезапно восстанавливаются. У некоторых пульсаров наблюдаются длительные вариации интенсивности — на порядок величины в течение месяцев [24].

Флуктуации амплитуды, в основном, нерегулярны, но у ряда пульсаров наблюдаются сильные периодические вариации в последовательности отдельных импульсов. Период таких вариаций у пульсара 0834+06 равен удвоенному основному его периоду. Быстрые флуктуации амплитуды большей частью обусловлены природой самого излучения, нежели, скажем, мерцаниями на неоднородностях межзвездной среды.

6. *Средняя форма импульсов.* Несмотря на сильные флуктуации интенсивности последовательных импульсов, для каждого пульсара существует определенная устойчивая форма среднего импульса, получаемая наложением друг на друга большого числа периодов (соответствующим интегрированием в течение нескольких минут). Средняя форма, или интегральный профиль, импульса очень стабильна в течение всего времени наблюдений данного пульсара. Однако она оказывается совершенно различной для разных пульсаров, как бы служа «почерком» пульсара.

Интегральный профиль имеет форму отдельного, чаще, двух четко выраженных пиков, а в редких случаях и трех—пяти. Ширина интегрального профиля, естественно, в несколько раз превышает ширину отдельных импульсов, соразмерно с количеством компонент-пиков. Расстояние между этими компонентами слабо зависит от частоты, причем, обычно низким частотам соответствует большее разделение компонент.

Внутри интегрального профиля отдельные импульсы располагаются случайно, так что форма среднего импульса отражает в известной мере распределение вероятности появления отдельного импульса в той или иной фазе профиля. Существует, однако, класс пульсаров с дрейфующими субимпульсами — внутри интегрального профиля одиночные импульсы регулярно следуют друг за другом, сдвигаясь постепенно от заднего фронта к переднему в своей последовательности.

Хьюгенин, Тейлор и Манчестер классифицируют пульсары по интегральному профилю на типы: S — с простой формой, C — со сложной, и D — с дрейфующими субимпульсами [25—27], отмечая при этом корреляцию ряда свойств пульсаров в соответствии с их типами. В частности, S-пульсары имеют короткие периоды, а C-пульсары обладают очень сильной поляризацией.

7. *Изменения периодов со временем.* Периоды большинства пульсаров лежат в интервале от 0.1 до 2 с. Только у трех пульсаров они меньше 0.1 с и у шести — больше 2 с. Измерения в течение длительных промежутков времени позволяют найти скорости  $\dot{P}$  изменения периодов со временем. Как правило, измеренные значения  $\dot{P}$  положительны, то есть, периоды пульсаров возрастают. Типичные скорости их изменений составляют  $1-10 \cdot 10^{-13}$  с/с. У нескольких пульсаров они превышают значения 50—100, а у пульсара 0531  $\pm 21$  с самым маленьким периодом она самая большая —  $423 \cdot 10^{-13}$  (с/с). Единственный пульсар с убывающим со временем периодом — это 1813—26 ( $\dot{P} = -0.3 \pm 0.3$ ).

Наряду с регулярным возрастанием периода у некоторых пульсаров наблюдаются нерегулярные отклонения от линейного возрастания. Особенно интересны неожиданные резкие скачки в сторону уменьшения периода — «сбои» периодов. Такие сбои наблюдались несколько раз у пульсара в Веле и у пульсара в Крабовидной туманности. Наиболее сильные сбои достигали 100—200 нс, причем за промежутки времени, заведомо не превышающие недели. После сбоев следует медленная релаксация скорости роста периода к своему прежнему значению [28—33].

8. *Спектры.* Исследование спектров излучения пульсаров особенно затруднительно из-за сильных и быстрых вариаций интенсивности. Поэтому обычно определяют спектр интегрального импульса, который оказывается довольно стабильным в течение многих лет (см., например, [34]).

Пульсары наблюдаются в радиодиапазоне от десятков МГц до десятков ГГц. Спектры излучения пульсаров имеют спадающую форму с резким скачком на высоких частотах. Типичная форма спектра

$$S \sim \omega^\alpha, \quad (3)$$

где спектральный индекс  $\alpha$  для разных пульсаров принимает значения от  $-1$  до  $-3$ . У некоторых пульсаров наблюдается низкочастотная граница спектра. Отдельные компоненты импульса обычно обладают разными спектральными индексами.

Радиосветимости пульсаров лежат в интервале  $10^{26} - 10^{27}$  эрг/с. Они посчитаны [12] в диапазоне частот  $\Delta \omega \approx 400$  МГц в предположении, что импульсное излучение сосредоточено внутри конуса (в соответствии с «ка-

рандашной» моделью пульсара) с углом раствора, определяемым шириной импульса  $2 = W/P$ . При изотропном излучении светимости будут примерно на три порядка выше.

9. *Поляризация.* Излучение пульсаров обычно очень сильно поляризовано, причем линейная поляризация преобладает над круговой. Поляризационные параметры систематически меняются в пределах отдельного импульса. Так, например, позиционный угол монотонно возрастает (или убывает), независимо от частоты, наиболее сильно меняясь близ середины импульса. Там же меняется знак круговой поляризации.

Несмотря на сильные изменения поляризационных параметров от импульса к импульсу, у интегрального профиля сохраняется достаточно высокая степень поляризации. У пульсаров с дрейфующими субимпульсами позиционный угол тесно связан с фазой субимпульса.

## II. Пульсары и Галактика

10. *Мерцания.* Пульсары были обнаружены при наблюдениях межпланетных мерцаний — дифракции радиоволн на облаках плазмы (заряженных частиц) солнечного ветра. Эти мерцания наиболее заметны на относительно длинных радиоволнах ( $\sim 4$  м) и имеют характерное время порядка секунды. Межпланетные мерцания позволяют получить наиболее точные данные об угловых размерах радиисточников, особенно при малых угловых размерах (например, у квазаров). Поскольку межпланетные мерцания ночью незначительны (именно ночью были обнаружены сигналы от пульсара 1919+21), их влияние на вариации интенсивности излучения пульсаров могут быть исключены.

Мерцания возникают и вследствие неоднородностей межзвездной среды, вызывая сильные вариации потока и тем самым воздействуя как на временные, так и на спектральные характеристики пульсаров. Характерные размеры неоднородностей межзвездной среды порядка  $10^6$  км и мерцания возникают при относительном изменении луча зрения на пульсар. Величина, обратная скорости этого изменения, определяет характерное время мерцаний — от нескольких минут до часов и даже дней (но не секунд или месяцев), со средним значением порядка 20 минут. Наблюдаемое корреляционное время мерцаний соответствует относительным скоростям движения пульсаров более 100 км/с.

Мерцания приводят к наблюдаемому уширению формы импульса — размыванию заднего фронта импульса на низких частотах, особенно у пульсаров с большими значениями меры дисперсии. У пульсаров с короткими периодами мерцания могут полностью «размазать» импульсы и привести к резкому завалу спектра на низких частотах, как, например, у пульсара в Крабовидной туманности.

11. *Мера дисперсии и расстояния до пульсаров.* Импульсы на разных частотах регистрируются в разные моменты времени. Причем, запаздывание тем больше, чем выше частота. Это обусловлено дисперсией на тепловых электронах на пути распространения радиоволн. Мера дисперсии тем выше, чем больше электронов вдоль пути  $R$ , пройденного излучением:

$$DM = \int_0^R n_e ds = \bar{n}_e \cdot R, \quad (4)$$

где  $\bar{n}_e$  — средняя электронная концентрация по лучу зрения. Поскольку групповая скорость волн зависит от коэффициента преломления, а последний известным образом — от частоты, то легко определить смещение по времени прихода двух разных частот [9]:

$$\Delta t = DM \cdot \Delta \left( \frac{1}{v^2} \right). \quad (5)$$

Эта зависимость от частоты великолепно подтверждается наблюдениями. Она позволяет по запаздыванию  $\Delta t$  определить меру дисперсии  $DM$ , а с ее помощью и приближенно оценить расстояние до пульсаров, если известна средняя электронная концентрация. Последняя, конечно, различна в разных направлениях в Галактике (в среднем она равна  $0.03 \text{ см}^{-3}$  пс). Мера дисперсии частично может быть обусловлена самим источником, и в этом смысле по соотношению (4) расстояния оцениваются сверху\*.

На низких галактических широтах величина меры дисперсии может быть очень сильно завышена из-за наличия областей ионизованного водорода *HII*. Это обстоятельство стараются по возможности учесть при определении расстояний [35, 36].

Расстояния до пульсаров оцениваются в пределах от нескольких парсек до нескольких тысяч. Обратное, зная расстояния до пульсаров из других данных, можно определить среднюю электронную концентрацию в их направлениях.

12. *Распределение пульсаров в Галактике.* Почти все пульсары распределены вблизи плоскости Галактики в пределах 500 пс по обе стороны от нее довольно симметричным образом (см., например, рис. 4). При этом наблюдается сильная концентрация их к плоскости — чуть менее половины пульсаров расположено ближе 100 пс от плоскости Галактики. Поскольку индикатором расстояний служит мера дисперсии, это следует и из диаграммы меры дисперсии — галактическая широта [37, 38], показываю-

\* Отсутствие измеримого параллакса означает, что пульсары находятся далеко вне пределов Солнечной системы.

щей сильное возрастание меры дисперсии в слое шириной  $10^\circ$  в окрестности  $b = 0$ . Более тонкое исследование показывает, что плоскость, к которой концентрируются пульсары, на самом деле на 20 пс ниже галактической, что соответствует положению Солнца над галактической плоскостью.

Распределение же пульсаров по галактической долготе показывает возрастание их плотности в направлении к центру Галактики [39]. Построенное в функции от расстояния до центра Галактики, распределение пульсаров быстро убывает с ростом «галактоцентрического радиуса». Падение плотности с этим расстоянием наблюдается и у остатков сверхновых [40].

13. *Мера вращения и магнитное поле Галактики.* Наблюдения линейной поляризации пульсаров позволяют оценить напряженность магнитного поля в окрестностях Солнца. Фарадеевское вращение плоскости поляризации определяет, так называемую, меру вращения

$$RM = \int_0^R \bar{H}_z n_s ds = \bar{H}_z \cdot DM, \quad (6)$$

где  $\bar{H}_z$  — среднее значение компоненты напряженности магнитного поля в направлении на пульсар. Фарадеевское вращение находят по измерениям разности позиционных углов на смежных частотах:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\nu} \sim \frac{RM}{\omega^2}. \quad (7)$$

Корректировка с данными по фарадеевскому вращению других внегалактических радиисточников позволяет детально исследовать структуру магнитного поля в Галактике [41].

Три самых быстрых пульсара 0531+21, 0833—45 и 1913+16 являются наиболее уникальными среди остальных. Первые два отождествлены с остатками взрыва сверхновых и имеют самый широкий диапазон излучения, третий входит в двойную систему. Их исследования предоставляют наиболее ценные данные для понимания явления пульсара.

14. *Пульсар 0531+21 в Крабовидной туманности.* Этот пульсар отождествлен с центральной звездой ( $\sim 17^m$ ) Крабовидной туманности [42], считающейся остатком взрыва сверхновой 1054 г. Период его самый маленький — 0.033 с, скорость изменения периода самая большая —  $433 \cdot 10^{-13}$  с/с, причем у него наблюдалось несколько сильных сбоев периода. До недавнего времени был единственным пульсаром, излучающим также оптические импульсы [43]. Диапазон его излучения  $10^7$  —  $10^{25}$  Гц, то есть это оптический, гамма-, рентгеновский и радио-пульсар.

Сама Крабовидная туманность обладает сильным синхротронным излучением во всех диапазонах. Его объяснение связывалось со свойствами центральной звезды Н. С. Кардашевым и Ф. Пачини, последний предвидел и возможность существования пульсара в Крабе [46]. Полная светимость во всех диапазонах  $L \sim 10^{37}$  эрг/с (напомним, что  $L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{33}$  эрг/с), основной диапазон — рентгеновский. Расстояние до пульсара 2000 пс, мера дисперсии  $57 \text{ см}^{-1}$  пс, примерно треть ее обусловлена туманностью или самим пульсаром.

На расстоянии 0.4 периода от основного импульса наблюдается промежуточный, в рентгеновских лучах такой же интенсивности, как и основной. В радиодиапазоне четко выделяется предимпульс, который с ростом частоты слабеет и исчезает в оптическом диапазоне. Радиопульс опережает оптический примерно на 39 периодов. На всех частотах импульсы испускаются синхронно. В отличие от оптических, радиопульсы подвержены очень сильным, порой стократным вариациям интенсивности.

15. *Пульсар 0833—45 в Парусах.* Находится в радиотуманности Вела X (Паруса), возраст которой оценивается в несколько десятков тысяч лет. Третий по малости периода — 0.089 с, он обладает и третьей по величине производной периода —  $125 \cdot 10^{15}$  с/с. Наиболее подвержен сильным сбоям периода [28—33]. Как и пульсар в Крабе, излучает в радио-, гамма- и рентгеновском диапазонах, а недавно зарегистрированы и оптические импульсы [51]. Однако, в отличие от пульсара в Крабе, импульсы 0833—45 в разных диапазонах смещены по фазе относительно друг друга. Рентгеновский импульс отстает от радиопульса на треть периода, основной (с двумя пиками, разделенными на 22 мс) оптический импульс также отстает от радиопульса, располагаясь симметрично между двумя гамма-пиками, отстоящими на 33 мс. Импульсное излучение в голубом свете соответствует примерно 25 звездной величине.

16. *Двойной пульсар 1913+16.* Открыт в 1974 г. Халсом и Тейлором [52]. При измерениях периода (второго по малости — 0.059 с) были обнаружены регулярные доплеровские вариации\* длительностью в 8 часов. Эти колебания объясняются орбитальным движением по орбите с большой полуосью, равной примерно  $R_{\odot}$  и эксцентриситетом 0.61. Радиальная скорость при движении по орбите меняется от +100 до —300 км/с. Оба компонента двойной системы предполагаются компактными с массами  $\sim 0.13 M_{\odot}$ . Расстояние до системы 6 кпс. По замечанию тер-Хаара [2], двойной пульсар 1913+16 предоставляет в наше распоряжение великолепную релятивистскую лабораторию (см. также [53, 54]).

\* Доплеровские изменения периодов остальных пульсаров полностью описываются движением Земли.

III. *Возрасты пульсаров*

17. *Кинематический возраст пульсаров.* Распределение пульсаров вблизи плоскости Галактики привело Ганна и Острикера [55] к заключению, что пульсары рождаются в плоскости Галактики и со временем покидают ее. Как показывают исследования собственных движений [56], пульсары обладают высокими скоростями движений, от 100 до 500 км/с. Среднее расстояние  $\bar{z}$  пульсаров от плоскости Галактики составляет 230 пс, а средняя скорость  $\bar{v} \sim 200$  км/с [56], что приводит к следующей оценке кинематического возраста пульсаров

$$T = \bar{z} / \bar{v} \approx 2 \cdot 10^6 \text{ лет.} \quad (8)$$

В целях косвенной проверки «генетической связи» пульсаров с другими объектами, в частности, с остатками сверхновых, интересно сравнить частоты их рождения в Галактике. Основанная на данных о радиоостатках, для сверхновых она составляет примерно одну в 50—150 лет. Судя по плотности распределения пульсаров в окрестности Солнца, следует ожидать порядка  $10^6$  активных пульсаров в Галактике. Тогда, исходя из кинематического возраста  $2 \cdot 10^6$  лет, Тейлор и Манчестер оценивают частоту рождения пульсаров как один в 40 лет [56]. Основываясь на данных о дисперсии собственных движений, Хансон [57] получает оценку кинематического возраста в  $4.6 \cdot 10^6$  лет и, следовательно, вдвое меньшую частоту рождения пульсаров в Галактике. Из других данных приведем теоретически рассчитанную частоту рождения нейтронных звезд — одна в 27 лет [58], и частоту смерти массивных звезд (с массами  $M > 4 M_{\odot}$ ) [59], близкую к оценке Хансона для частоты рождения пульсаров.

Кинематический возраст пульсаров не подвержен сильным влияниям селекции и не зависит от выбора шкалы расстояний. С другой стороны, он находится в противоречии с данными о характеристических возрастах пульсаров (см. ниже). Это, в частности, заставляет заподозрить сильную завышенность характеристических возрастов по сравнению с истинными. Соображения последующих параграфов устраняют это противоречие.

18. *Характеристические возрасты пульсаров.* Для оценки возрастов отдельных пульсаров обычно используется факт возрастания со временем периодов пульсаров. Принято считать, что пульсары рождаются с начальными значениями периодов, близкими к нулю [3]. Это предположение лежит также в основе теоретических построений моделей пульсаров. Тогда возраст пульсара можно определить как отношение периода  $P$  к скорости его возрастания  $\dot{P}$ :  $\tau = P/\dot{P}$ . Теоретические соображения, а также предполагающееся убывание  $\dot{P}$  с ростом  $P$  приводят к более «разумной» оценке:

$$\tau \approx \frac{1}{2} P_1 \dot{P}. \quad (9)$$

Вычисленные таким образом характеристические возрасты для двух пульсаров 0531+2 (1240 лет) и 0833—45 (11300 лет), отождествленных с остатками сверхновых, неплохо согласуются с возрастными этими остатков, определенными другими методами (заметьте, что у этих пульсаров периоды самые маленькие).

Таблица 1

$\lg \tau$	3	4	5	6	7	8	9
$N$	1	4	14	38	25	3	1

В табл. 1 приводится распределение 86 пульсаров с известными значениями  $P$  по характеристическому возрасту  $\tau$  [12]. Если бы характеристические возрасты правильно отражали «истинные» возрасты пульсаров, их распределение было бы равномерным по  $\tau$ , по крайней мере, при малых  $\tau$ . Это следует в предположении, что пульсары рождаются с малыми начальными «периодами-возрастами» и эволюционируют примерно одинаковым путем. Распределение же, приводимое в табл. 1, не соответствует ожидаемой пропорциональности числа пульсаров длине интервала  $\tau$  и указывает на сильную завышенность характеристических возрастов над истинными. Среднее значение характеристического возраста равно  $\tau = 5 \cdot 10^7$  лет [12], оно на порядок выше кинематического.

19. С какими периодами рождаются пульсары? На такую постановку вопроса обратил внимание автора в 1970 г. В. А. Амбарцумян. Уже тогда количество пульсаров составляло 55 и можно было с определенностью заключить, что представление о том, что все пульсары рождаются с очень малыми начальными периодами, неверно [60].

Решение этого вопроса основывается на известном распределении  $N(P)$  пульсаров по периодам и следующих допущениях:

- 1) Искомое распределение  $n(P_0)$  рождающихся пульсаров по начальным значениям периодов стационарно во времени.
- 2) Периоды пульсаров возрастают с некоторой средней (постоянной) скоростью  $a = \dot{P}$ .

Одновременно эти допущения означают, понятно, стационарность во времени наблюдаемого распределения  $N(P)$ . Если первое допущение является естественным, то применимость второго, вообще говоря, подлежит проверке. В соответствии с 2) вводится пока неопределенный масштаб времени  $a$ .

Не останавливаясь здесь на математической стороне задачи, приведем ее окончательное решение применительно к настоящему случаю. Искомая функция  $n(P)$  определяется выражением

$$n(P) = \begin{cases} \frac{d}{dP} N(P), & P < T_0, \\ \frac{d}{dP} [N(P - T_0) + N(P)], & P > T_0, \end{cases} \quad (10)$$

где  $T_0$  — значение  $P$ , соответствующее максимуму (если таковой имеется) распределения  $N(P)$ . Случай  $P > T_0$  означает, что функция  $N(P)$  при  $P < T_0$  должна быть смещена вправо на величину  $T_0$ , сложена с функцией  $N(P)$  при  $P > T_0$  и продифференцирована. Ниже для удобства параметр, соответствующий начальному значению периода, будем обозначать буквой  $P_0$ . Перейдем теперь к обсуждению наблюдаемого распределения  $N(P)$  пульсаров по периодам.

20. *Распределение пульсаров по периодам.* На рис. 1 представлено распределение известных 320 пульсаров по периодам. Для него характерно наличие двух максимумов, соответствующих значениям  $P$ , равным 0.5 с и 1.25 с. Третий и четвертый максимумы обусловлены очень малым количеством пульсаров (по 10 каждый), чтобы их принимать во внимание. Распределение построено специальным методом, позволяющим устранить известные некорректности в построении гистограмм.

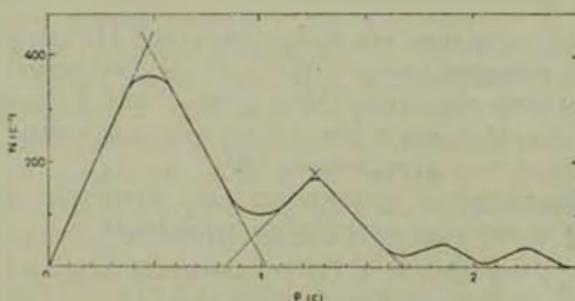


Рис. 1.

Два хорошо выраженных максимума в распределении пульсаров по периодам обнаруживались нами, начиная с 1970 года, и их наличие подтверждалось по мере накопления новых данных о пульсарах. Тейлор и Манчестер [3] исключают влияние селективных факторов на форму (первого) максимума, а на заметный «провал» в области  $P \approx 1$  с недавно указали независимо друг от друга авторы работ [17, 61].

Распределение  $N(P)$  хорошо представляется в виде суммы двух распределений «треугольников», изображенных на рисунке прямыми линиями. Оба треугольника являются равнобедренными, причем первый соответствует  $\approx 220$  пульсарам, а второй  $\approx 80$ . Решение задачи о нахождении функции  $n(P_0)$  требует их раздельного рассмотрения как двух независимых групп.

Если отсутствие пульсаров с большими значениями периодов означает, что пульсарам присуще определенное время жизни, после которого они «угасают», то сравнительная малость числа пульсаров с малыми периодами есть, очевидно, прямое указание на то, что не все пульсары рождаются с начальными периодами, близкими к нулю, а только очень малая их доля.

21. *Распределение рождающихся пульсаров по периодам.* Применение формул (10) к распределению  $N(P)$  представленному на рис. 1, приводит к следующему результату. Пульсары первой группы (соответствующей первому максимуму) рождаются с начальными периодами, принимающими значения в интервале  $0 < P_0 < T_0$ , равновероятно. Время активной жизни этих пульсаров равно  $T_0$ , то есть равно времени, за которое период пульсара возрастает, скажем, от 0 до  $T_0$  (со скоростью  $\alpha$ ). Пульсары второй группы (соответствующей второму максимуму в распределении по периодам) рождаются с начальными периодами, лежащими в интервале  $0.8 < P_0 < 1.25$  с, также равновероятно. Время их активной жизни порядка  $0.45$  с  $\approx T_0$ .

Описанное распределение рождающихся пульсаров по начальным периодам представлено на рис. 2. На нем указана также третья группа пульсаров, соответствующая третьему максимуму на рис. 1. Не исключена воз-

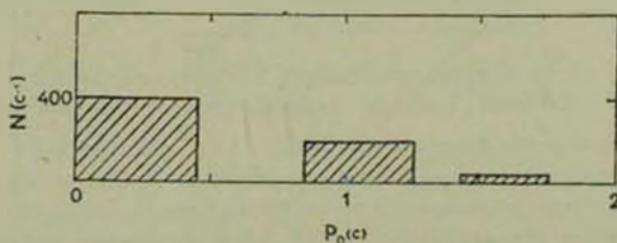


Рис. 2.

можность, что пульсары второй группы являются частью (40%) пульсаров первой группы, временно (на время  $\sim 0.3$  с) прекратившей свою пульсационную активность. Исходя из других соображений, ниже мы увидим, что это не так.

Заметим, что, если бы все пульсары рождались с нулевыми начальными периодами, то функция  $n(P_0)$  должна была описываться дельта-функцией  $\delta(P_0)$ .

22. *Зависимость между периодом и его производной.* На диаграмме на рис. 3 отложены значения  $P$  и  $\dot{P}$  для 86 пульсаров с известными значениями  $\dot{P}$  [12]. Величины  $\dot{P}$  меняются в довольно широких пределах от  $10^{-16}$  до  $10^{-13}$  с/с. Нельзя не заметить, что у нескольких пульсаров с очень малыми периодами значения  $\dot{P}$  особенно велики. Это обстоятельство заставляет думать, что скорость возрастания периода убывает с ростом периода. Заметим, что с физической точки зрения более приемлемой является обратная пропорциональность между  $\dot{P}$  и  $P$ . В вопросе о корреляции этих величин у разных авторов имеются разногласия [2, 3]. Пунктирная прямая на диаграмме 3, указывающая на слабое возрастание  $\dot{P}$  с ростом  $P$ , проведена методом наименьших квадратов.

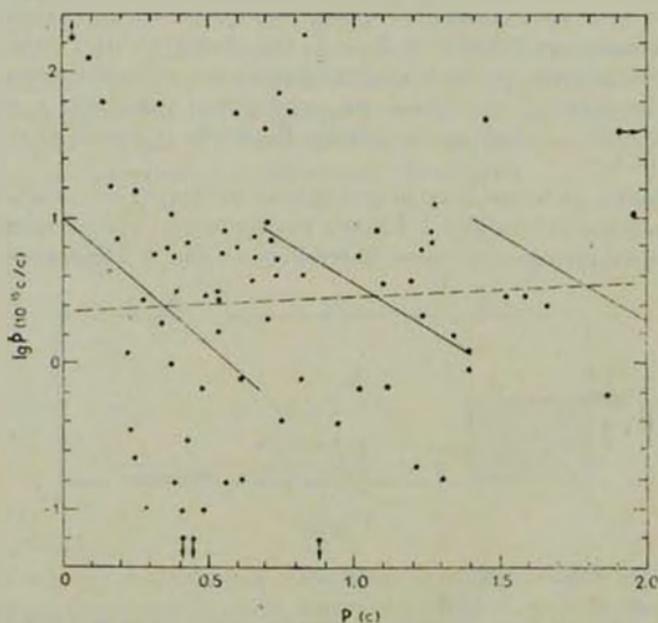


Рис. 3.

Имея в виду наличие трех независимых групп пульсаров, указанных в предыдущем пункте, рассмотрим независимо друг от друга отдельные части диаграммы  $P-\dot{P}$ , соответствующие интервалам периодов (0—0.7),

(0.7 — 1.4) и (1.4 — 2.1) с. Для каждой из этих групп пульсаров на диаграмме 3 методом наименьших квадратов проведены прямые, аппроксимирующие зависимость  $t$  от  $P$ . Теперь мы видим явное убывание  $P$  в зависимости от  $t$  для каждой из трех рассматриваемых групп. Это в свою очередь свидетельствует в пользу независимости этих групп пульсаров.

Интересно, что наклоны этих трех прямых на диаграмме 3, как и средние значения  $\bar{P}$  для каждой группы довольно близки друг к другу. Последние соответствуют примерно значению  $a \approx 3.7 \cdot 10^{-15}$  с/с.

23. *Об истинных возрастах пульсаров.* С целью получить оценки возрастов пульсаров, более близкие к истинным, можно пересмотреть определение характеристических возрастов, считая, например, что пульсары рождаются с начальными значениями периодов, равными 0, 0.7 и 1.4 с, соответственно упомянутым группам. Тогда для пульсаров I группы характеристические возрасты (9) останутся неизменными, а для II и III групп они существенно уменьшатся.

Вычисленные с такой поправкой характеристические возрасты  $\bar{t}$  (в миллионах лет) приводятся в табл. 2. При вычислениях, из I группы, содержащей 42 пульсара, были исключены 7, из второй, состоящей из 29, — 2 пульсара, характеристические возрасты которых на порядок и выше превышали соответствующие средние.

Таблица 2

Группа	I	II	III
$\bar{t}$	3.6	3.2	3.8
$T_0$	4.4	4.3	4.0

Во второй строке табл. 2 приводится среднее время активной жизни  $T_0$  пульсаров, соответствующее времени  $T_0 \approx 0.5$  с при значениях  $a = 3.6, 3.7$  и  $4.0$  ( $10^{-15}$  с/с), составляющих средние значения  $\bar{P}$  для каждой из трех групп. Как видим, значения характеристических возрастов близки между собой для трех групп и к среднему времени активной жизни пульсаров, равной  $T_0 \approx 4.4 \cdot 10^6$  лет. Заметим, что истинные возрасты пульсаров должны оцениваться вдвое меньшей величиной, так как они рождаются с периодами, равными не 0, 0.7 и 1.4 с, как было принято при вычислениях выше, а равномерно распределенными в соответствующих интервалах.

Таким образом, с учетом того, что пульсары рождаются не с нулевыми значениями начальных периодов, известное противоречие между их ки-

нематическими и истинными возрастами (или характеристическими) может быть устранено.

24. *Диаграмма период — расстояние от плоскости Галактики.* Если действительно у всех трех групп пульсаров возрасты примерно одинаковы, и если они, образуясь в плоскости Галактики, покидают ее в среднем с одинаковыми скоростями, то нужно ожидать равенства средних удаленностей пульсаров от плоскости Галактики для всех групп.

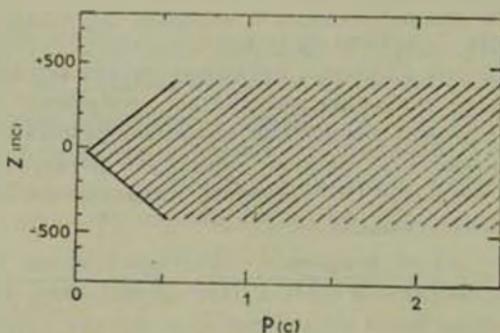


Рис. 4.

На рис. 4 приведена диаграмма период—расстояние от плоскости Галактики для 147 пульсаров с известными  $z$  (данные взяты из [12]). Почти 95% пульсаров замечательным образом ложатся в заштрихованную на рис. 4 область, имеющую форму «заточенного карандаша», резко обозначая при этом края «острия». В пределах «острия» с  $P < 0.5$  с распределены 65 пульсаров, в то время как перед «острием» находятся 7 пульсаров. Наиболее сильно удалены от острия пульсары 0531+21 (в Крабе) и двойной пульсар 1913+16. Пульсар в Крабе сравнительно молод и следовательно, родился с указанным отклонением от плоскости Галактики. В вершине «острия» расположен пульсар Велы X.

Форма «карандаша» на диаграмме соответствует представлению о том, что пульсары I группы рождаются в плоскости Галактики с периодами в интервале (0—0.5) с, с течением времени удаляясь со скоростью  $\sim 100$  км/с. Края «карандаша» при  $P > 0.5$  с также соответствуют средней скорости удаления от плоскости  $\sim 100$  км/с. То обстоятельство, что пульсары второй и третьей групп удалены от плоскости Галактики не более, чем пульсары I группы, означает, что они не являются «потомками» последних в том смысле, в котором упоминалось в п. 21.

Интересно, что такую же форму «карандаша» имеет распределение пульсаров на диаграмме  $(-\lg P)$ —расстояние от плоскости Галактики.

При этом в вершине «острия» опять расположен пульсар в Веле X со значением  $\lg P = -12.5$ , а пульсар в Крабе и двойной пульсар снова выпадают из области «карандаша».

май, 1979 г.

Бюраканская астрофизическая  
обсерватория

## PULSARS (the observational data review)

M. A. MNATSAKANIAN

The review of the observational data of pulsars is given. The issue of the pulsars ages is analysed.

### ЛИТЕРАТУРА

1. A. Hewish, Pulsars, Ann. Rev. Astron. Astroph., 8, 265, 1970.
2. Д. тер-Хаар, Пульсары, УФН, 118, 523, 1976.
3. J. H. Taylor, R. N. Manchester, Recent Observations of Pulsars, Ann. Rev. Astron. Astroph., 15, 19, 1977.
4. A. Hewish, Three Years with Pulsars, Mitteilungen der Astronomische Gesellschaft, 31, 15, 1972.
5. Р. Н. Манчестер, в сб. «Галактическая и внегалактическая радиоастрономия», Мир М., 1976.
6. И. С. Шкловский, Звезды, их рождение, жизнь и смерть, Наука, М., 1975.
7. Г. С. Саакян, в сб. «Проблемы современной космогонии», Наука, М., 1972.
8. Сб. «Пульсары» (русск. перев. под ред. В. В. Биткевича), Мир, М., 1971.
9. A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, R. A. Collins, Nature, 217, 709, 1968 (русск. пер. в [8]).
10. A. Hewish, Pulsating Stars, a Nature preprint, p. VII, 1968 (русск. пер. в [8]).
11. J. D. H. Pilkington, A. Hewish, S. J. Bell, T. W. Cole, Nature, 218, 126, 1968 (русск. пер. в [8]).
12. J. H. Taylor, R. N. Manchester, Ap. J., 80, 794, 1975.
13. M. I. Large, A. E. Vaughan, M. N., 151, 277, 1971.
14. J. G. Davies, A. G. Lyne, J. H. Seirudakis, Nature, 240, 223, 1972.
15. J. G. Davies, A. G. Lyne, J. H. Seirudakis, Nature, 244, 84, 1973.
16. R. A. Hulse, J. H. Taylor, Ap. J., 191, L59, 1974.
17. R. A. Hulse, J. H. Taylor, Ap. J., 201, L55, 1975.
18. R. N. Manchester, A. G. Lyne, J. H. Taylor, J. M. Durdin, M. I. Large, A. G. Little, M. N., 183, 409, 1978.
19. M. Damashek, J. H. Taylor, R. A. Hulse, Ap. J., 225, L31, 1978.
20. P. E. Hardee, Ap. J., 227, 958, 1979.
21. D. W. Richards, J. Rankin, G. A. Zetsis, Nature, 251, 57, 1974.

22. В. В. Витковский, Ю. Н. Алексеев, В. Ф. Журавлев, Ю. П. Шитов, *Nature*, 224, 49, 1969.
23. Ю. Н. Алексеев, В. В. Витковский, В. Ф. Журавлев, Ю. П. Шитов, ДАН СССР, 187, № 2, 1969.
24. T. W. Cole, H. K. Hesse, C. G. Page, *Nature*, 225, 713, 1970.
25. G. R. Huguenin, R. N. Manchester, J. H. Taylor, *Ap. J.*, 169, 97, 1971.
26. J. H. Taylor, G. R. Huguenin, *Ap. J.*, 167, 273, 1971.
27. D. H. Roberts, *Ap. J.*, 207, 949, 1976.
28. V. Rudhakrishnan, R. N. Manchester, *Nature*, 222, 228, 1969.
29. P. E. Reichley, G. S. Downs, *Nature*, 222, 229, 1969.
30. P. E. Reichley, G. S. Downs, *Nature Phys. Sci.*, 234, 48, 1971.
31. R. N. Manchester, W. M. Goss, P. A. Hamilton, *Nature*, 239, 291, 1976.
32. P. E. Boynton, E. J. Groth, D. P. Hutchinson, G. P. Nanos, R. B. Partridge, D. T. Wilkinson, *Ap. J.*, 175, 217, 1972.
33. E. Losen, *Nature*, 258, 688, 1975.
34. A. D. Kuzmin, V. M. Malofeev, Yu. P. Shitov, J. G. Davies, A. G. Lyne, B. Rowson, *M. N.*, 185, 441, 1978.
35. K. Davidson, Y. Terzian, *Nature*, 221, 729, 1969.
36. A. J. R. Prentice, D. ter-Haar, *Nature*, 222, 964, 1959.
37. K. Davidson, Y. Terzian, *Astron. J.*, 71, 849, 1969.
38. Y. Terzian, в сб. "The Physics of Pulsars", Gordon and Breach, 1972, p. 85.
39. J. H. Taylor, R. N. Manchester, *Ap. J.*, 215, No. 3, 1977.
40. D. H. Clark, J. L. Caswell, *M. N.*, 174, 267, 1976.
41. Дж. А. Веркер, в сб. "Галактическая и внегалактическая радиоастрономия" Мир, М., 1976.
42. D. H. Staelin, E. C. Reifenstein, *Science*, 162, 1481, 1968.
43. W. J. Cocke, M. J. Disney, D. J. Taylor, *Nature*, 221, 525, 1969 (русск. пер. в [8]).
44. F. Pacini, *Nature*, 221, 169, 1969.
45. F. Pacini, *Nature*, 216, 567, 1967.
46. F. Pacini, *Nature*, 219, 145, 1968.
47. J. M. Comella, H. D. Craft, R. V. Lovelace, J. M. Sutton, G. L. Tyler, *Nature*, 221, 453, 1969 (русск. пер. в [8]).
48. E. K. Conklin, H. T. Howard, J. S. Miller, E. J. Wampler, *Nature*, 222, 552, 1969 (русск. пер. в [8]).
49. E. A. Boldt, U. D. Desai, S. S. Holt, P. J. Serlemittos, R. F. Silverberg, *Nature*, 223, 280, 1969.
50. H. V. Bradt, в сб. "The Physics of Pulsars", Gordon and Breach, 1972, p. 33.
51. P. T. Wallace, B. A. Peterson, P. G. Murdin, I. J. Danziger, R. N. Manchester, A. G. Lyne, W. M. Goss, F. G. Smith, M. J. Disney, K. F. Hartley, D. H. P. Jones, G. W. Wellgate, *Nature*, 266, 692, 1977.
52. R. A. Hulse, J. H. Taylor, *Ap. J.*, 193, L51, 1975.
53. C. M. Will, *Ap. J.*, 203, 851, 1976.
54. P. M. McCulloch, J. H. Taylor, R. Weisberg, *Ap. J.*, 227, L133, 1979.
55. J. E. Gunn, J. P. Ostriker, *Ap. J.*, 160, 979, 1970.
56. J. H. Taylor, R. N. Manchester, *Ap. J.*, 215, 885, 1977.
57. R. B. Hanson, *M. N.*, 186, 357, 1974.
58. J. G. Hills, *Ap. J.*, 221, 973, 1978.
59. J. P. Ostriker, D. O. Richstone, T. X. Thunn, *Ap. J.*, 189, L119, 1974.
60. М. А. Мнацаканян (неопубликовано).
61. J. G. Davies, A. G. Lyne, J. H. Seiradakis, *M. N.*, 179, 635, 1977.