

УДК: 524.354.4—77

СУЩЕСТВУЮТ ЛИ РЕАЛЬНО ТИПЫ РАДИОПУЛЬСАРОВ?

Б. М. ВЛАДИМИРСКИЙ

Поступила 31 октября 1986

Принята к печати 20 марта 1988

Пульсары двух ранее выделенных групп (О и П) сравниваются по некоторым ранее неизученным параметрам. Показано, что между упомянутыми группами имеет место значимое различие по средней по импульсу линейной поляризации; зависимости формы импульса от расстояния до галактической плоскости; характеру изменения угла между осью магнитного диполя и осью вращения нейтронной звезды в функции расстояния от галактической плоскости; положению на диаграмме $P-\dot{P}$. Проведенное разбиение на два типа оказывается близким к классификации, где основным разделяющим параметром является наблюдаемый период. Совокупность всех найденных различий однозначно указывает на неоднородность наблюдаемой популяции радиопульсаров. Вероятно, П-пульсары являются аналогами пульсара PSR 0531+21 в Крабовидной туманности, а пульсары типа О имеют свойства, аналогичные свойствам пульсара PSR 1913+16, прошедшего стадию аккреции и возобновившего затем радиоизлучение.

1. *Введение.* Первая попытка классифицировать пульсары по каким-то морфологическим признакам, разбив их на определенные группы, была предпринята спустя четыре года после открытия этих объектов [1]. Одновременно была выдвинута важная идея [2, 3] о возможном существовании двух поколений пульсаров, приобретающих существенные различия в процессе эволюции. В дальнейшем этот круг вопросов рассматривался многими авторами (см., в частности, [4—6]).

В настоящее время большинство исследователей при анализе статистики пульсаров исходит, однако, из предположения об однородности наблюдаемой популяции. Между тем, если это исходное предположение неверно, есть основание усомниться в корректности сопоставления наблюдений с имеющимися теоретическими моделями пульсаров, в надежности оценок их важнейших астрофизических параметров.

К вопросу о классификации пульсаров возможны, очевидно, различные подходы. Один из них — чисто эмпирический и связан с поисками эффективного классифицирующего параметра. Было показано, что таким параметром может быть величина $\eta = L_R / \dot{E}$ — коэффициент трансфор-

мации вращательной энергии нейтронной звезды \dot{E} в радиоизлучение (L_R — радиосветимость) [7]. Эта величина характеризует интегральные радиоизлучающие свойства магнитосферы и изменяется в очень широких пределах: от $\eta \approx 5 \cdot 10^{-2}$ (PSR 1919-22) до $\eta \approx 3 \cdot 10^{-10}$ (пульсар в Крабе). Пульсары с низким ($\eta < 10^{-6}$) и высоким ($\eta > 10^{-5}$) значением этого параметра обладают, видимо, существенно разными свойствами, образуя, соответственно, группы II (связаны с типичными плерионами) и O (old, обладают признаками старых объектов). Разграничивающее значение между упомянутыми группами находится также эмпирически — по резкому изменению какого-нибудь наблюдаемого параметра в функции η , например, по скачкообразному изменению $\bar{z}(\eta)$ (\bar{z} — расстояние от галактической плоскости).

Ниже обсуждаются различия II- и O-групп пульсаров по признакам, которые ранее не рассматривались, и кратко анализируется вопрос о вероятной природе этих двух групп.

Дальнейшее изложение существенным образом опирается на списки объектов, отнесенных к упомянутым группам. Перечень пульсаров надежно идентифицированных как II ($\eta < 10^{-6}$), представлен в табл. 1. Он составлен на основе каталога [8].

Таблица 1

| № | PSR | P (с) | № | PSR | P (с) | № | PSR | P (с) |
|----|---------|---------|----|---------|---------|----|---------|---------|
| 1 | 0105+65 | 1.2837 | 16 | 0906-17 | 0.4016 | 31 | 1719-37 | 0.2362 |
| 2 | 0136+57 | 0.2724 | 17 | 0919+06 | 0.4306 | 32 | 1740-03 | 0.4446 |
| 3 | 0154+61 | 2.3517 | 18 | 0922-52 | 0.7463 | 33 | 1742-30 | 0.3674 |
| 4 | 0203-40 | 0.6305 | 19 | 0950+08 | 0.2531 | 34 | 1820-31 | 0.2841 |
| 5 | 0355+54 | 0.1564 | 20 | 1001-47 | 0.3071 | 35 | 1822-09 | 0.7690 |
| 6 | 0450+55 | 0.3407 | 21 | 1055-52 | 0.1971 | 36 | 1842+14 | 0.3755 |
| 7 | 0458+46 | 0.6385 | 22 | 1221-63 | 0.2165 | 37 | 1914+09 | 0.2703 |
| 8 | 0531+21 | 0.0331 | 23 | 1237-41 | 0.5122 | 38 | 1915+13 | 0.1946 |
| 9 | 0540+23 | 0.2460 | 24 | 1317-53 | 0.2797 | 39 | 1916+14 | 0.1809 |
| 10 | 0611+22 | 0.3349 | 25 | 1336-64 | 0.3786 | 40 | 1929+10 | 0.2265 |
| 11 | 0656+14 | 0.3849 | 26 | 1503-51 | 0.8407 | 41 | 1930+22 | 0.1444 |
| 12 | 0727-18 | 0.5102 | 27 | 1504-43 | 0.2868 | 42 | 1946-25 | 0.9576 |
| 13 | 0740-28 | 0.1668 | 28 | 1642-03 | 0.388 | 43 | 2021+51 | 0.5298 |
| 14 | 0833-45 | 0.0892 | 29 | 1702-18 | 0.2990 | 44 | 2151-56 | 1.3737 |
| 15 | 0853-33 | 1.2675 | 30 | 1706-16 | 0.6531 | 45 | 2327-20 | 1.6436 |

2. Отличительные признаки групп пульсаров с малыми и большими значениями η . Важнейшие отличия пульсаров с $\eta > 10^{-5}$ (тип O) и

$\eta < 10^{-6}$ (тип II) суммированы в табл. 2. Чтобы не перегружать таблицы, она только частично перекрывается с соответствующей таблицей работы [7].

Таблица 2

| Свойства, параметры | Тип O | Тип II |
|---|--|--|
| Классифицирующий параметр $\eta = L_R/E$ | $> 10^{-5}$ | $< 10^{-6}$ |
| Наблюдаемый период P для расстояний < 3 кпк: $N(P)$ $P(z)$ $P(\tau)$ | Максимумы 0.6 и 1.3 с $N(P)$ не зависит от z Корреляция отсутствует | Одновершинное распределению, максимум 0.3 с Период P увеличивается с возрастанием z Корреляция $r = +0.5 \pm 0.1$ $\rho_{\infty}^{0.2}$ |
| Начальный период P_0 | ≈ 0.3 с [20] | ≈ 0.02 с |
| Пространственное распределение, расстояния d шкала высот над галактической плоскостью x_0 концентрация к рукавам Н II поведение \bar{z} в областях, занимаемых на диаграмме $P-P$ (рис. 2) | d нередко превышает 10 кпк 0.44 ± 0.08 умеренная в занимаемой области \bar{z} не меняется | 90% объектов < 3 кпк 0.21 ± 0.05 тесная [9] \bar{z} увеличивается в направлении, перпендикулярно линиям $\tau = \text{const}$ от 0.10 до 0.29 кпк |
| Средняя поляризация по импульсу, % (в скобках число объектов, цифры справа — значимость различий) | 610 МГц [10] 15.8 (21) 400 МГц [11] 11.6 (9) 400 МГц [12] 14.6 (8) | 35.4 (9) 0.05 34.3 (3) 0.07 29.2 (2) 0.04 |
| Угол между осью диполя и осью вращения, β_1, β_2 [17] | $\beta_1 \approx 15^\circ$ β_1 не коррелирует с β_2 и не зависит от z | $\beta_1 \approx 30^\circ$ β_1, β_2 увеличиваются с возрастанием z |
| Средняя форма импульса, оцениваемая по индексу | 0.22, не зависит от z | 0.22 при $z < 0.2$ кпк 0.06 при $z > 0.2$ кпк |

Различия обеих групп в распределении по периодам хорошо заметны в том случае, когда сравниваются объекты, находящиеся примерно в одной пространственной области. Поэтому на рис. 1 все надежно классифицированные пульсары группы O разбиты еще на две подгруппы в зависимости от расстояния. Разграничивающее значение 3 кпк выбрано, чтобы получить примерно одинаковое число объектов в обеих подгруппах. Кроме того, большинство II-пульсаров расположено не далее 3 кпк. Заметно, что второй пик в распределении O-пульсаров появляется только за счет близких объектов (что было отмечено в [19]). Замечательно, что для пульсаров типа O распределение не изменяется с изменением высоты над

галактической плоскостью. Тенденция к увеличению в среднем периода с возрастанием z наблюдается только для Π -пульсаров.

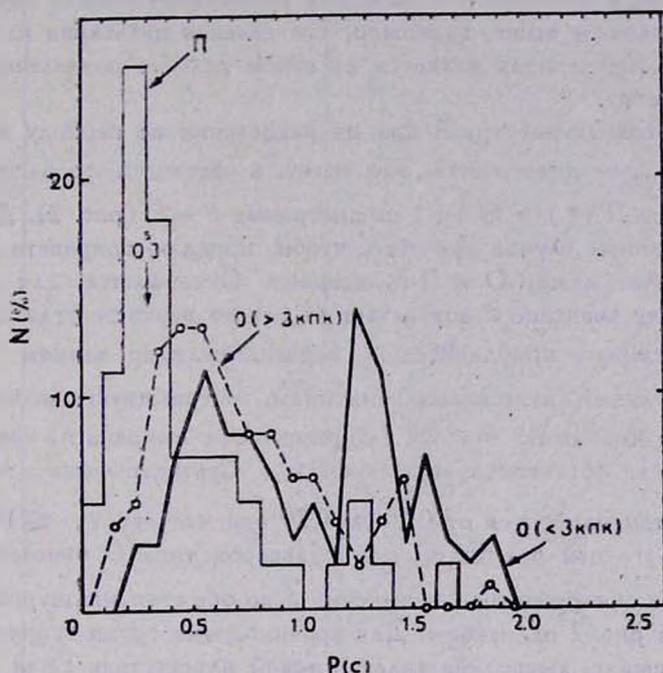


Рис. 1. Распределение по периодам P для пульсаров типа Π (гистограмма) и типа O (кривые для расстояний больших и меньших 3 кпк).

Существуют различные аргументы и соображения, указывающие на то, что большинство наблюдаемых пульсаров имеет большие начальные периоды ≈ 0.3 [5, 20, 21]. Это заключение относится к пульсарам типа O , составляющим около $2/3$ всей популяции. С другой стороны, для пульсаров типа Π имеет место значимая корреляция между характеристическим возрастом τ и периодом ($r = +0.5 \pm 0.1$ для списка табл. 1 с добавлением PSR 1509—58). Если не обращать внимания на «тавтологический» характер этой связи (для O -пульсаров она отсутствует), то имеет место зависимость $P \propto \tau^{-0.21 \pm 0.02}$, и тогда начальный период для пульсаров Π должен лежать в пределах $12 \div 22$ м сек.

По крайней мере по четырем признакам пульсары с коротким периодом $P < 0.3 \div 0.7$ с значимо отличаются от долгопериодических, причем эти различия допускают ясную физическую интерпретацию [6, 18]. В связи с этим открывается возможность использовать наблюдаемый период в качестве классифицирующего параметра. Если для разграничивающего

значения принять $P = 0.3$, то классификация по η и P приводит к очень близкому результату, так как большинство короткопериодических пульсаров имеет низкое значение η и попадает преимущественно в группу II. В связи со сказанным выше, возможно, что деление пульсаров на два типа по наблюдаемому периоду является на самом деле их разделением по начальному периоду.

Полного совпадения групп при их разделении по периоду и по величине η , однако, не имеет места. Это видно, в частности, по расположению пульсаров типа II (\bullet) и O ($+$) на диаграмме $P - \dot{P}$ (рис. 2). Диаграмма показана в данном случае для того, чтобы проиллюстрировать еще одно важное различие между O и II-пульсарами. Оказывается, для пульсаров типа II среднее значение z возрастает от левого верхнего угла диаграммы к правому нижнему приблизительно перпендикулярно линиям $\tau = \text{const}$. Цифры близ линий, нанесенных пунктиром, соответствуют значениям \bar{z} в полосе между линиями $\tau = \text{const}$ (ширина полос выбрана из соображений равенства числа объектов в этих полосах). Статистическая значимость различий \bar{z} , изменяющихся от 0.10 до 0.29 кпк, составляет $\lesssim 10^{-3}$. Применение аналогичной процедуры для пульсаров типа O отмеченной закономерности не обнаруживает — значения \bar{z} по обе стороны штрих-пунктирной линии на рис. 2 одинаковы. Для сравниваемых групп существенно отличаются и шкалы высот над галактической плоскостью. Если аппроксимировать эти распределения экспонентами, то, как видно из табл. 2, значения шкал высот Z_0 отличаются вдвое (для O-пульсаров при определении Z_0 далекие объекты во избежание эффектов селекции не рассматривались). Наконец, нижние три строки табл. 2 содержат результаты поиска различий между рассматриваемыми группами по признакам, которые ранее не анализировались. Как видно, линейная поляризация, усредненная по импульсу, для пульсаров типа II в среднем вдвое больше, чем для O-пульсаров, причем для первых имеется тенденция к уменьшению поляризации с увеличением расстояния от галактической плоскости (отсутствует для пульсаров типа O). Средние профили импульсов, сравниваемые по «индексу сложности» $|\omega_e/\omega_{50\%} - 1|$ (здесь ω_e и $\omega_{50\%}$ — соответственно эквивалентные ширины импульсов и ширины на полувысоте согласно [8]), не отличаются, но для II-пульсаров значение индекса падает с увеличением z . Это можно истолковать в том смысле, что с увеличением возраста у пульсаров этого типа начинают преобладать простые импульсы (S). У пульсаров группы O индекс не зависит от z .

В рамках модели полярной шапки значение угла между осью вращения нейтронной звезды и осью магнитного диполя может быть получено

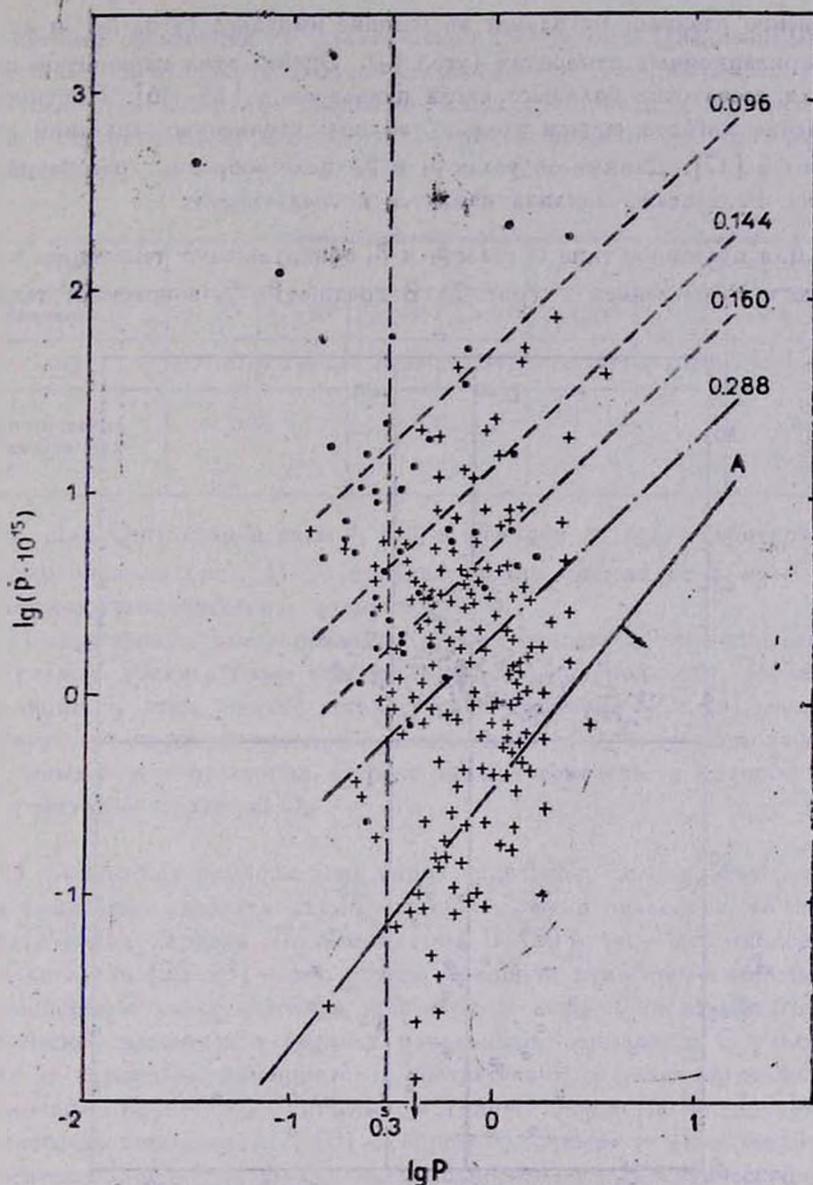


Рис. 2. Диаграмма рассеяния в координатах $P-P'$. Пульсары типа II — кружки. Пульсары O — кресты. Штриховые линии — $\tau = \text{const}$. Цифры около них — средние значения Z расстояния от галактической плоскости, кпк — для объектов, расположенных выше этих линий. Штрих-пунктирная линия — разделение объектов типа O (значения Z выше и ниже этой линии не различаются). Прямая A стрелкой отмечает область, где должны располагаться пульсары, прошедшие стадию аккреции в двойных системах.

существенно разными методами: по ширине импульса (угол β_1) и исходя из поляризационных измерений (угол β_2). Оценка этих параметров получена для достаточно большого числа пульсаров в [13—16]. Критическое обсуждение методов оценки угла и таблицы уточненных значений представлены в [17]. Данные об углах β_1 и β_2 целесообразно рассматривать отдельно. Результаты анализа сводятся к следующему:

1. Для пульсаров типа II углы β_1 и β_2 обнаруживают тенденцию к увеличению с возрастанием η (рис. 3). В среднем β_1 , β_2 возрастают также с

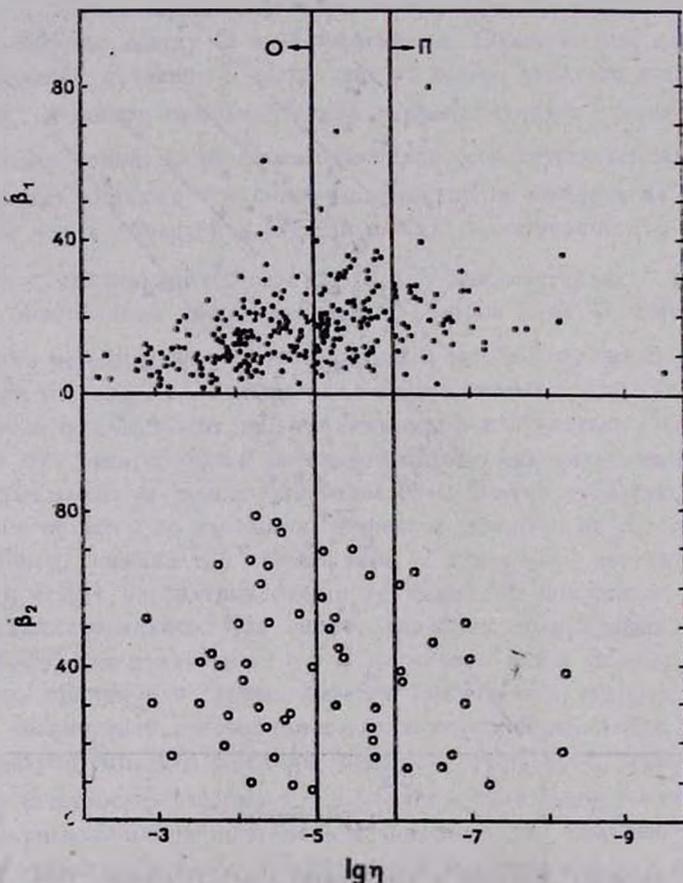


Рис. 3. Диаграммы рассеяния в координатах η (коэффициент трансформации вращательной энергии пульсара в радиовлучение, логарифмическая шкала) — угол между осью диполя и осью вращения нейтронной звезды. β_1 — угол оценен по ширине импульса (верхний рисунок). β_2 — угол вычислен из поляризационных измерений (нижний рисунок).

увеличением расстояния от галактической плоскости z . Цифровой материал представлен в отдельной табл. 3 (использованы все данные об углах, в том числе для не вполне надежно классифицированных объектов; для оценки статистической значимости различий применяется критерий Вандер-Вардена).

Таблица 3

| Тип | П | | | | О | | | | |
|------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Значения β | $\beta_1 < 20^\circ$ | $\beta_1 > 20^\circ$ | $\beta_2 < 40^\circ$ | $\beta_2 > 40^\circ$ | $\beta_1 < 15^\circ$ | $\beta_1 > 15^\circ$ | $\beta_2 < 40^\circ$ | $\beta_2 > 40^\circ$ |
| z (n) | | 0.21(47) | 0.29(42) | 0.10(13) | 0.22(9) | 0.35(107) | 0.32(86) | 0.15(18) | 0.25(23) |
| Статистическая значимость различий | | 0.01 | | 0.05 | | — | | 0.07 | |

2. Для О-пульсаров углы β_1 и β_2 в функции η ведут себя противоположным образом (рис. 3). β_1 определенно не зависит от z , хотя угол β_2 , возможно, увеличивается с возрастанием z .

Перечисленные выше различия в совокупности с отмеченными ранее [7] служат убедительным свидетельством неоднородности наблюдаемой популяции. С этим хорошо согласуется заключение [22, 23], полученное в результате чисто формального поиска кластеров, о существовании трех различных групп пульсаров. Первая из них совпадает с группой П, вторая и третья — с группой О.

3. *Возможная природа двух типов пульсаров.* Если кратко резюмировать важнейшие свойства двух выделенных групп пульсаров, то получается следующая картина. Пульсары типа П (80% их — короткопериодические, согласно [22, 23] — это группа «ранних» пульсаров) обладают всеми свойствами «классических» нейтронных звезд. Они образуются в галактической плоскости с малыми начальными периодами. С увеличением z все их параметры изменяются в соответствии со «стандартными» представлениями об эволюции. Пульсары типа О (около 60% их — долгопериодические, согласно [22, 23] — «промежуточные» и «поздние») имеют относительно большую шкалу высот относительно галактической плоскости. Все изученные параметры этих пульсаров практически не зависят от z . Вероятно, что пульсары этого типа имеют начальный период, близкий к наблюдаемому. Обладая в среднем заметно более высокой радиосветимостью, пульсары типа О обнаруживаются вплоть до очень больших расстояний (≥ 10 кпк) и составляют около 2/3 всей наблюдаемой популяции.

Истолковать однозначно природу пульсаров типа О пока, видимо, затруднительно. Существуют, однако, признаки, позволяющие отождест-

вить О-пульсары с классом «раскрученных» (recycled) пульсаров, прошедших стадию аккреции при их эволюции в тесной двойной системе [7]. В соответствии с такой схемой пульсары типа П не аккрецировали — они образовались после второй вспышки сверхновой в двойной системе, либо были одиночными. В пользу предположения о тождественности пульсаров типа О с пульсарами, прошедшими стадию аккреции (и возобновившими затем радиоизлучение), свидетельствуют следующие аргументы:

1. По крайней мере некоторые пульсары — компоненты двойных систем — являются, несомненно, пульсарами типа О (например, PSR 1913+16; PSR 0820+02 — эти пульсары бесспорно прошли стадию аккреции [24]). Подобные объекты на диаграмме $P - \dot{P}$ располагаются в левом нижнем углу [25], ниже линии «раскрутки» (spin-up), нанесенной на рис. 2 согласно [26]. В этой области диаграммы располагаются около трех десятков объектов, надежно классифицированных как О-пульсары.

2. Период пульсаров после окончания аккреции (начальный период после возобновления радиоизлучения) должен быть близок к равновесному, подчиняясь известному соотношению $P \propto H^{6/7}$ (H — магнитное поле). Как это было отмечено в [7], пульсары типа О обладают именно такими свойствами.

3. Для аккрецировавших пульсаров, получивших дополнительный момент, их характеристический возраст τ не отражает кинематического (и хронологического) возраста, что как раз и характерно для пульсаров О-типа.

4. О-пульсары и рентгеновские пульсары, согласно развиваемому предположению, генетически связаны и должны иметь аналогичные пространственные распределения в Галактике. Такого рода близость пространственных распределений, видимо, и в самом деле имеет место [27].

5. В обсуждаемой схеме должны наблюдаться пары разлетающихся пульсаров (принадлежащих типам О и П). Оказывается возможным, видимо, отыскать такие пары, обладающие признаками двойственности в прошлом [28, 29].

Если принять предположение о тождественности О-пульсаров с пульсарами, прошедшими стадию аккреции, то остается неясной причина громадного ($\approx 10^2$) увеличения радиосветимости после аккреции. Не исключено, что это как-то связано с изменением химического состава поверхности нейтронной звезды после аккреции (модель генерации радиоизлучения, в которой интенсивность зависит от концентрации водорода, рассматривалась в [30]).

Из-за того, что характеристические возрасты τ -пульсаров типа II меньше, чем эти возрасты O-пульсаров, можно было бы предположить, что указанные группы отличаются только возрастом, так что II-пульсары переходят, эволюционируя обычным образом, в тип O. Такое предположение, однако, неприемлемо. Можно обратить внимание, например, на то, что объекты типов II и O, занимая одну и ту же область в центре $P-P'$ диаграммы, казалось бы, не должны различаться. Однако, на самом деле, астрофизически — это различные объекты, отличающиеся пространственным распределением. Они в действительности различаются и по своим физическим характеристикам, например, по радиосветимости. Различие по радиосветимости не может быть объяснено небольшим различием в средних значениях углов β_1 . Пульсары типов II и O принадлежат к различным классам светимости — соответственно «низкой» и «высокой»: в частотном распределении по светимости они лежат по разные стороны «провала» $\lg L_R \simeq 27.5$ [31].

Если вышезложенное толкование природы O-пульсаров окажется правильным, то «эталоными» объектами, с которыми следовало бы сравнивать теоретические модели, должны быть II-пульсары — аналоги пульсара в Крабовидной туманности. В этой связи интересно отметить, что увеличение угла β_1 в функции Z для пульсаров этого типа противоречит предположению о том, что основным механизмом замедления пульсаров являются магнитодипольные потери: если преобладает этот вид потерь, должно наблюдаться «выстраивание» (уменьшение β). Указанная закономерность, если она реальна, согласуется с преобладанием «токовых» потерь [32].

Проведенное рассмотрение позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Предположение об однородности наблюдаемой популяции пульсаров неверно. Пульсары с высоким ($\eta > 10^{-5}$) и низким ($\eta < 10^{-6}$) коэффициентами трансформации вращательной энергии в радиоизлучение различаются по многим признакам, образуя обособленные группы.

2. Вероятно, пульсары $\eta < 10^{-6}$ (тип II) аналогичны по своим свойствам пульсару в Крабовидной туманности. Пульсары $\eta > 10^{-5}$ являются, видимо, аналогами PSR 1913+16. Они в процессе эволюции прошли стадию аккреции в двойных системах.

Автор признателен И. Ф. Малову, Ю. И. Нешпору и анонимному рецензенту за критические замечания.

ARE THERE REAL TYPES OF THE RADIOPULSARS?

B. M. VLADIMIRSKY

The radiopulsars of two types — Π and O — which have been distinguished in an early paper are now compared for several other parameters. It has been shown that Π and O — pulsars significantly differ in a) mean polarisation of the pulses, b) the dependence of the form of the pulse on the distance to the galactic plane, c) the change of the angle between magnetic moment and rotation axes as a function of the distance to the galactic plane, d) the disposition at $P - \dot{P}$ diagram. The classification on the types Π and O is partly similar to the division of the pulsars based on the observable period. All these differences strongly suggest the inhomogeneity of observed pulsar population. The Π — pulsars are probably analogous to PSR 0531 + 21 (plerions) but the pulsars of O — type were very likely to pass the stage of the accretion in binary systems in evolution (as PSR 1913 + 16).

ЛИТЕРАТУРА

1. J. H. Taylor, G. R. Huguenin, *Astrophys. J.*, 167, 273, 1971.
2. В. Ф. Шварцман, *Астрон. ж.*, 48, № 2, 438, 1970.
3. Г. С. Бисноватый-Козан, Б. В. Комберг, *Письма в Астрон. ж.*, 2, № 7, 388, 1976.
4. R. R. Kochhar, *Nature*, 270, 39, 1977.
5. М. А. Мнацаканян, *Астрофизика*, 15, 515, 1979.
6. И. Ф. Малов, С. А. Сулейманов, *Астрофизика*, 18, 107, 1982.
7. Б. М. Владимирский, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 66, 192, 1983.
8. R. N. Manchester, J. H. Taylor, *Astron. J.*, 86, 1953, 1981.
9. Б. М. Владимирский, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 72, 125, 1985.
10. P. M. McCulloch, P. A. Hamilton, R. N. Manchester, J. G. Ables, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 183, 645, 1978.
11. P. A. Hamilton, P. M. McCulloch, J. G. Ables, M. M. Komisaroff, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 180, 1, 1977.
12. R. N. Manchester, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 23, No. 199, 283, 1971.
13. А. Д. Кузьмин, И. М. Дагкесаманская, *Письма в Астрон. ж.*, 9, 149, 1983.
14. И. Ф. Малов, *Астрофизика*, 19, 161, 1983.
15. R. Narayan, M. Vtsekand, *Astron. and Astrophys.*, 113, L3, 1982.
16. А. Д. Кузьмин, И. М. Дагкесаманская, В. Д. Пугачев, *Письма в Астрон. ж.*, 10, 854, 1984.
17. И. Ф. Малов, *Астрофизика*, 24, 507, 1986.
18. И. Ф. Малов, *Астрон. ж.*, 62, 252, 1985.
19. J. H. Huang, K. L. Huang, Q. H. Peng, *Astron. and Astrophys.*, 148, 391, 1985.
20. С. А. Герасимов, Ю. И. Нешпор, А. А. Степанян, *Изв. АН СССР, сер. физ.* 45, 629, 1981.
21. M. Vtsekand, R. Narayan, *Astrophys. and Astron.*, 2, 315, 1981.

22. *M. Fracassini, L. E. Pasinetti, G. Raffaelli*, Proc. Course and Workshop on Plasma Astrophysics, Varenna, Italy. ESA SP-207, 1984, p. 315.
23. *M. Fracassini, P. Maggi, L. E. Pasinetti, G. Raffaelli*, Proc. Intern. Course and Workshop on Plasma Astrophys. Sukhumi, USSR, ESA-SP (in press)
24. *G. Srinivasan, E. P. J. van den Heuvel*, Astron. and Astrophys., 108, 143, 1982.
25. *P. R. Backus, J. H. Taylor, M. Damask*, Astrophys. J. Lett., 255, L63, 1982.
26. *M. A. Alpar, A. F. Cheng, M. A. Ruderman, J. Shaham*, Nature, 300, 728, 1982.
27. *D. G. Blair, B. N. Candy*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 212, 219, 1985.
28. *Б. М. Владимирский*, Астрофизика, 21, 535, 1984.
29. *M. Fracassini, P. Maggi, L. E. Pasinetti*, Astrophys. and Space Sci., 128, 363, 1986.
30. *Mao Xinjie, Tong Yi*, Astrophys. and Space Sci., 124, 187, 1986.
31. *S. Pineault*, Astrophys. J., 301, 145, 1986.
32. *В. С. Бескин, А. В. Гуревич, Я. Н. Истомин*, Ж. эксперим. и теор. физ., 85, 401, 1983.