

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 18

ФЕВРАЛЬ, 1982

ВЫПУСК 1

УДК 524.354

ДВА ТИПА ПУЛЬСАРОВ?

И. Ф. МАЛОВ, С. А. СУЛЕПМАНОВА

Поступила 8 апреля 1981

Принята к печати 5 декабря 1981

Приведены данные об отличии короткопериодических пульсаров от долгопериодических в наблюдаемой зависимости ширины среднего профиля от периода, изменении позиционного угла вдоль профиля и ряде других особенностей. Показано, что эти данные могут быть объяснены в рамках предположения о двух различных моделях пульсаров: модели полярной шапки для долгопериодических пульсаров и модели Смита — для пульсаров с короткими периодами.

1. *Введение.* В настоящее время известно более 300 пульсаров. Такое число объектов позволяет провести статистический анализ их наблюдаемых параметров и попытаться ответить на вопрос: все ли пульсары принадлежат к одному типу или же по каким-либо параметрам существует их заметное различие?

В процессе исследования пульсаров неоднократно проявлялось отличие короткопериодических объектов от долгопериодических. Обнаруженный на построенной по 50 пульсарам гистограмме основных периодов $\Lambda(P)$ дефицит объектов с $P \sim 0.9$ с позволил Шварцману еще в 1970 г. [1] выдвинуть гипотезу о двух типах пульсаров (с эжекцией частиц и с аккрецией газа из межзвездной среды).

Уже на первых стадиях исследований пульсаров было также обнаружено, что у пульсаров с короткими периодами ($P < 0.75$ с), как правило, наблюдаются простые («одногоорбые») профили. Эти пульсары стали отнести к классу S. С другой стороны, у многих долгопериодических пульсаров ($P > 0.75$ с) средние профили состоят из двух и более компонентов

Приводимые во введении данные о различных пульсаров заимствованы из книги Манчестера и Тейлора [2], где можно также найти ссылки на оригинальные работы по этому вопросу.

(пульсары класса С). В работе [3] указывается на возможность различных механизмов генерации излучения в пульсарах типа С (модель полого конуса) и типа S (релятивистский механизм).

Оказалось, кроме того, что шесть из семи пульсаров с обнаруженным интеримпульсом обладают короткими периодами (от 0.033 до 0.769 с). У седьмого пульсара PSR 0904+77 истинный период, возможно, составляет половину принимаемого значения $P = 1.579$ с.

Выяснилось далее, что у пульсаров с большими периодами доля времени в состоянии нуллинга (молчания) больше [4], причем, как следует из рис. 6а работы [4], при $P \sim 1$ с возможно скачкообразное увеличение доли импульсов с нулевой интенсивностью.

Ниже приводятся дополнительные аргументы в пользу деления пульсаров на два класса и делается попытка объяснения наблюдаемого различия параметров этих пульсаров.

2. *Наблюдаемые различия свойств пульсаров с короткими и длинными периодами. а) Зависимость ширины импульса от периода.* В работе [5] показано, что однородная выборка из 222 пульсаров дает статистическую зависимость ширины импульса от периода $\bar{W} \propto P^{0.57 \pm 0.10}$, согласующуюся с предсказанием модели полярной шапки при дипольном магнитном поле $W \propto \sqrt{P}$. Если использовать выборку из [2] (299 пульсаров с известным W), то также получим зависимость, близкую к $W \propto \sqrt{P}$:

$$\lg W = (0.54 \pm 0.05) \lg P + (1.50 \pm 0.02). \quad (1)$$

Однако, строя аналогичные зависимости при ограниченном сверху периоде ($P < P_1$), получим (рис. 1), что до $P_1 = 1$ с тангенс угла наклона остается близким к 0.5, но при меньших периодах он увеличивается и становится близким к 1 при $P_1 \leq 0.3$ с. Такой должна быть зависимость $W(P)$ и модели Смита — модели релятивистского формирования диаграммы излучения [6]. Если взять пульсары с $P > 1$ с, то для них $W \propto P^{0.57 \pm 0.10}$. Дисперсия значений $W(P)$ довольно большая, и ошибка определения наклона при малых P_1 велика, однако тенденция к укрупнению в сторону коротких периодов очевидна.

Таким образом, наблюдается различный наклон прямой $\lg W(\lg P)$ для пульсаров с длинными и короткими периодами, что свидетельствует о возможном различии механизмов генерации излучения в этих двух группах пульсаров.

б) *Относительное число пульсаров с простыми профилями.* В качестве одного из возражений против модели полого конуса приводилось [7] заниженное относительное число пульсаров с однокомпонентными профилями.

ми, предсказываемое этой моделью в реализации Рудермана—Сазерленда [8], по сравнению с действительно наблюдаемым. Прямое вычисление профилей в рамках механизма излучения кривизны при дипольном магнитном поле показывает [9], что если бы все пульсары излучали таким путем, то число пульсаров с однокомпонентными профилями N_1 было бы в несколько раз меньше, чем с двухкомпонентными профилями N_2 ($N_1/N_2 < 20\%$). Однако реально наблюдается $N_1/N_2 \sim 1$. Следовательно, либо неверны основные предпосылки модели Рудермана—Сазерленда, либо большая часть однокомпонентных профилей в пульсарах формируется совершенно другим механизмом.

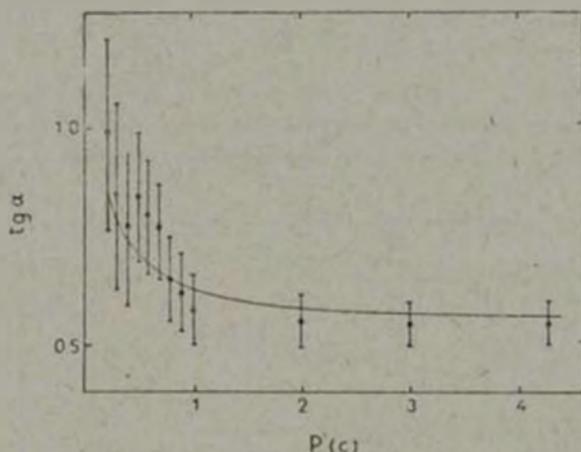


Рис. 1. Зависимость тангенса угла наклона кривой $\lg W' (\lg P)$ от периода.

в) *Доля энергии вращения, теряемая на излучение.* Доля вращения нейтронной звезды, перерабатываемая в радионизлучение, значительно отличается у короткопериодических и долгопериодических пульсаров [10] и увеличивается с ростом периода примерно от 10^{-3} до 10^{-2} . В работе [10] также отмечалось, что у короткопериодических пульсаров рост эффективности переработки с ростом P более медленный, чем у пульсаров с большими периодами. Граница раздела лежит примерно при $P \sim 0.5$ с и также может быть вызвана различием в механизмах генерации излучения у двух групп пульсаров (с $P > 0.5$ с и с $P < 0.5$ с).

г) *Изменение позиционного угла плоскости поляризации вдоль профиля.* Уже беглый обзор поляризационных данных показывает, что наибольший поворот позиционного угла наблюдается у долгопериодических пульсаров, а наименьший — у короткопериодических. Наиболее полные поляризационные измерения проведены на частотах вблизи 410 МГц [2,

11—15]. По этим данным определялась величина $\Delta\psi$ как разница между максимальным и минимальным значениями позиционного угла плоскости линейной поляризации при условии, что область долгот, в которой происходит это изменение, включает основную часть среднего профиля. Мы также ограничились пульсарами, для которых изменение позиционного угла носит монотонный характер. Значения $\Delta\psi$ в зависимости от периода для 38 пульсаров нанесены на рис. 2. Здесь же показаны средние значения $\overline{\Delta\psi}$ и среднеквадратичные отклонения для короткопериодических и долгопериодических пульсаров. Соответствующие величины равны:

$$\overline{\Delta\psi} = 35 \pm 15, P < 0.7 \text{ с}, N = 18;$$

$$\overline{\Delta\psi} = 90 \pm 50, P > 0.7 \text{ с}, N = 20.$$

Приведенные величины свидетельствуют в пользу того, что с увеличением периода происходит значительное изменение как средней величины, так и общего разброса значений полного поворота плоскости поляризации.

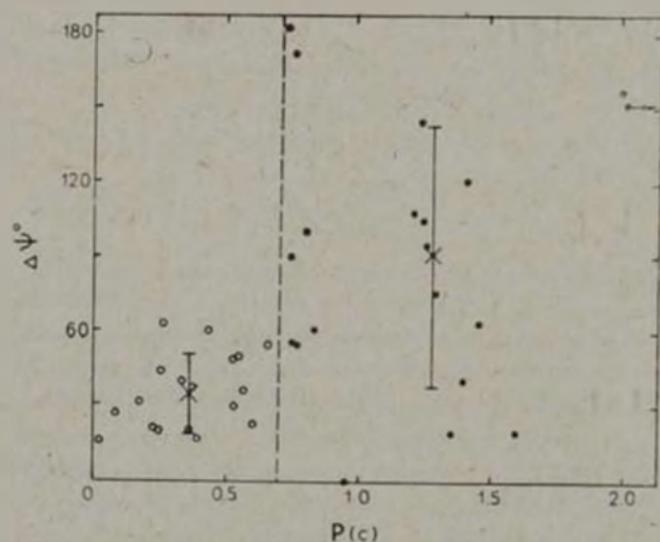


Рис. 2. Полное изменение позиционного угла вдоль среднего профиля для 38 пульсаров. Светлыми кружками отмечены пульсары с $P < 0.7$ с, темными — с $P > 0.7$ с. Указаны средние значения и среднеквадратичные отклонения для пульсаров с $P < 0.7$ с и $P > 0.7$ с.

3. Интерпретация наблюдаемых различий пульсаров. а) Роль аккреции межзвездного газа на нейтронную звезду. Если различные пульсары связаны с разным темпом аккреции межзвездного газа на нейтронную

звезду, должно наблюдаться различие светимости L_R пульсаров в диске Галактики и вне его (L_R должно быть пропорционально плотности нейтрального водорода n_H [16]). Вычисляя L_R по формуле [17]:

$$L_R = \pi^2 d^2 W \frac{S_{400}}{P} \Delta\nu \quad (\text{эрг/с}), \quad (2)$$

где S_{400} — средняя плотность потока на частоте 400 МГц, d — расстояние до пульсара, $\Delta\nu$ — ширина спектра (принималась равной 400 МГц), показывают, что нет никакой зависимости L_R от z (рис. 3). Средние значения других параметров также не зависят от z . Так, $\bar{P} = 0.86$ с и $\bar{P} = 1.5 \cdot 10^{-14}$ для $z > 160$ пс, а для $z < 160$ пс $\bar{P} = 0.79$ с и $\bar{P} = 10^{-14}$.

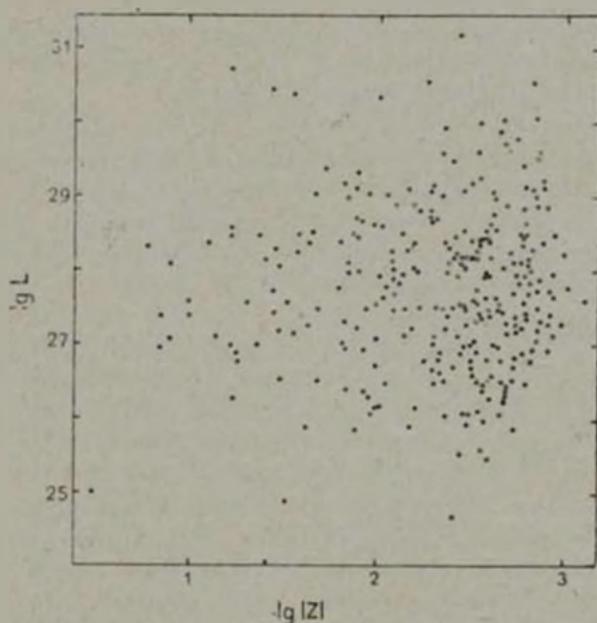


Рис. 3. Зависимость радиосветимости пульсаров (в эрг/с) от z -координаты (в килопарсеках).

Шварцман [1] предполагал, что аккреция присуща пульсарам с $P \lesssim 1$ с. 90 пульсаров из 321 [2] имеют $P > 1$ с. Для них у 27 пульсаров ($z = 59$ пс) $z < 160$ пс и у 63 — $z > 160$ пс ($z = 458$ пс). При этом, однако, их средняя светимость оказывается одинаковой ($\lg L_1 \approx \lg L_2 \approx 27$). Следовательно, наблюдаемые различия пульсаров,

по-видимому, связаны не с темпом аккреции межзвездного газа на нейтронную звезду, а с различием в строении магнитосферы или в механизме генерации излучения у долгопериодических и короткопериодических пульсаров.

б) *Отличие в строении магнитосфер у пульсаров с короткими и длинными периодами.* Как принято в большей части существующих моделей пульсаров, основные явления, приводящие к наблюдаемому излучению, разыгрываются внутри магнитосферы пульсара, т. е. в области, расположенной между поверхностью нейтронной звезды ($R_0 \sim 10^8$ см) и световым цилиндром ($R_{LC} = cP/2\pi$). Поскольку разброс периодов пульсаров достигает двух порядков, то естественно ожидать различия в строении магнитосферы у пульсаров с сильно отличающимися периодами. Так, у PSR 0531 + 21 $R_{LC} = 1.6 \cdot 10^9$ см, а у PSR 1845 - 19 $R_{LC} = 2.1 \cdot 10^{10}$ см, и при дипольном магнитном поле диапазон изменения магнитного поля будет отличаться у этих пульсаров на 6 порядков. Столь большое масштабное различие магнитосфер приведет, в частности, к следующему эффекту [10].

Если наблюдаемое радиоизлучение связано с ленгмюровскими колебаниями в магнитосфере, то у долгопериодических пульсаров генерация излучения может происходить и вблизи поверхности, а у пульсаров с короткими периодами — только в окрестности светового цилиндра.

Эта модель как показано ниже, может объяснить описанные различия в наблюдаемых свойствах пульсаров.

в) *Зависимость $W(P)$.* Прежде всего становится понятным различное поведение кривой $W(P)$ для пульсаров с короткими и длинными периодами. У пульсаров с $P > 1$ с генерация излучения происходит вблизи поверхности, где $W \propto 1/P$ (модель полярной шапки). У пульсаров с $P < 0.3$ с генерация, в основном, происходит вблизи светового цилиндра, и $W \propto P$. При $0.3 \text{ с} < P < 1 \text{ с}$ область генерации может находиться на умеренных расстояниях от нейтронной звезды, где уже заметны релятивистские эффекты, связанные с совместным вращением (коротацией) излучающей плазмы. Если ширина импульса определяется по-прежнему раскрытом конуса открытых силовых линий, то для наблюдателя излученный угол сокращается во времени, и длительность импульса будет равна [6]

$$W = \frac{P}{\beta} (\theta - \beta \sin \theta). \quad (3)$$

где $\theta \approx \frac{3}{2} \sqrt{\frac{r}{R_{LC}}}$, а $\beta = \frac{\Omega r}{c} = \frac{r}{R_{LC}}$. Полагая $\theta < 1$ и $\sin \theta \approx \theta$, получим:

$$W = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2Pr}{\pi c}} \left(1 - \sqrt{\frac{2\pi r}{cP}} \right). \quad (4)$$

Наклон кривой $\lg W(\lg P)$ определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d \lg W}{d \lg P} = \frac{0.5}{1 - \sqrt{\frac{2\pi r}{cP}}}. \quad (5)$$

Соответствующая зависимость $\lg \alpha(P)$ для $r = 2 \cdot 10^8$ см представлена на рис. 1 сплошной линией. Следует подчеркнуть, что выражения (4) и (5) справедливы достаточно далеко от светового цилиндра, где ширина окна еще определяется открытыми силовыми линиями. Для пульсаров с $P \geq 1$ с область с $r = 2 \cdot 10^8$ см еще довольно далека от светового цилиндра ($R_{LC} \sim 5 \cdot 10^8$ см), и приближенно $W \approx \sqrt{P}$. При $P < 1$ с начинает сказываться сжатие импульса, и наклон кривой $\lg W(\lg P)$ постепенно увеличивается ($0.5 < \operatorname{tg} \alpha < 1$), что хорошо согласуется с характером наблюдаемой зависимости $\lg W(\lg P)$.

г) *Интеримпульсы.* Если $\mu \perp \Omega$ (μ — магнитный дипольный момент), и если луч зрения близок к экваториальной плоскости вращения нейтронной звезды, то наблюдатель будет видеть два всплеска излучения за период. У короткопериодических пульсаров этому благоприятствует то обстоятельство, что при релятивистском формировании луча ширина диаграммы по широте $\Delta\varphi$ составляет десятки градусов (при $\Omega r/c = 0.92$ $\Delta\varphi = 21^\circ$) [14]. Поэтому вероятность попадания луча зрения в диаграммы, соответствующие двум полюсам, может быть большой. С увеличением периода релятивистские эффекты становятся слабее, диаграмма начинает определяться конусом открытых силовых линий, и вероятность попадания луча зрения в обе диаграммы существенно уменьшается.

С этим может быть связано отсутствие обнаруженных интеримпульсов у пульсаров с $P > 1$ с (PSR 0904+77 в виду сомнений в правильности определения его периода и самого существования интеримпульса из рассмотрения исключается). Если считать, что главный импульс и интеримпульс связаны с двумя магнитными полюсами и принять точку зрения о перпендикулярности оси вращения к оси магнитного диполя у пульсаров с малыми периодами и выравнивании этих осей с ростом периода [2], можно ожидать зависимости относительной интенсивности (\bar{v}) интеримпульса от периода. Действительно, предполагая, что интенсивность в экваториальном направлении изменяется по гауссову закону, получим для отношения интенсивностей излучения, исходящего из двух полюсов (рис. 4),

$$\delta(\varphi) = \frac{e^{-((\varphi - \varphi_0)/\Phi)^2}}{e^{-((\varphi - \varphi_0)/\Phi)^2}} = e^{-4\varphi_0/\Phi^2} \quad \varphi < \bar{\varphi},$$

$$\xi(\varphi) = \frac{e^{-((\varphi + \varphi_0)/\Phi)^2}}{e^{-((\varphi - \varphi_0)/\Phi)^2}} = e^{-4\varphi_0/\Phi^2} \quad \varphi > \bar{\varphi}.$$
(6)

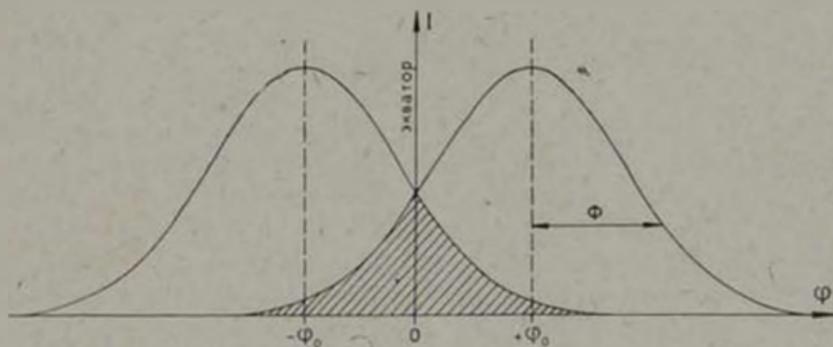


Рис. 4. Взаимное расположение диаграмм излучения из двух полюсов.

Считая далее, что луч зрения наблюдателя ориентирован относительно диаграмм излучения случайно, для ожидаемой относительной интенсивности интеримпульса будем иметь

$$\bar{\delta} = \frac{1}{180} \int_{-90}^{90} \delta(\varphi) d\varphi = \frac{\Phi^2 (1 - e^{-360\varphi_0/\Phi^2})}{360\varphi_0}.$$
(7)

Углы здесь измерены в градусах. Таким образом, если с увеличением периода растет φ_0 , ожидаемая величина $\bar{\delta}$ будет уменьшаться*. Наблюдения (рис. 5) согласуются с этим выводом. Если предположить, что $\varphi_0 \propto P$, то из (7) получим

$$\bar{\delta} = \frac{A}{P} (1 - e^{-P^2}).$$

Эта зависимость представлена на рис. 5 при $A = 0.05$. Такое значение A можно, например, получить, если предположить, что φ_0 меняется от 0° до 90° при изменении P от 0 до 5 с ($\varphi_0 = 18^\circ P$) и $\Phi = 18^\circ$ (это соответствует $\Gamma = [1 - (\Omega r/c)^2]^{-1/2} \approx 3$ или $r/R_{LC} \approx 0.94$).

* Следует подчеркнуть, что при больших φ_0 значения интенсивности в зоне перекрытия (заштрихована на рис. 4) становятся очень низкими, и интеримпульс может оказаться ниже современной чувствительности.

Когда ширина окна определяется открытыми силовыми линиями, $W \propto \sqrt{P}$ и, скажем, на 400 МГц [5]

$$W \approx 0.03 \sqrt{P} \text{ или } \theta = \pi \frac{W}{P} \approx \frac{0.1}{\sqrt{P}}$$

Поскольку модель полярной шапки, как мы считаем, работает для $P > 1$ с, то

$$\bar{\theta} = \frac{\int_1^4 \theta(P) dP}{\int_1^4 dP} \approx 4^\circ.$$

На рис. 6 приведены зависимости $\bar{\theta}(\tau_0)$ для $\Phi = 18^\circ$ (релятивистское формирование диаграммы) и $\Phi = 4^\circ$ (полый конус)^a, из которых видно, что для полого конуса уже при $\Phi_0 = 4^\circ$ относительная интенсивность интеримпульса $\sim 1\%$. К тому же, как легко показать, вероятность обнаружения интеримпульса в этом случае равна $4 \cdot 10^{-3}$, т. е. из всех пульсаров с $P > 1$ с только у одного можно ожидать наличия интеримпульса (и, наиболее вероятно, очень слабого).

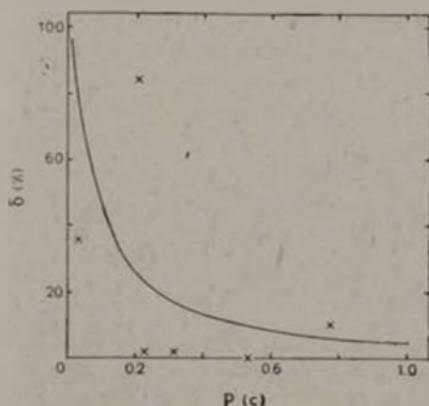


Рис. 5. Зависимость средней относительной интенсивности интеримпульса от периода.

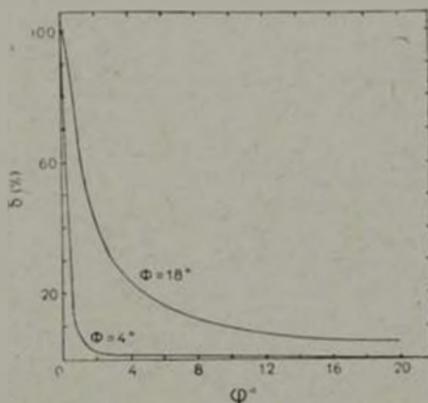


Рис. 6. Зависимость средней относительной интенсивности интеримпульса от наклона оси диполя к экватору.

^a Для $\Phi = 4^\circ$ предполагалось так же, как и для $\Phi = 18^\circ$, что распределение интенсивности по углу описывается гауссовым законом. Однако и при более сложном законе все сделанные далее выводы остаются справедливыми.

Проведенное рассмотрение показывает, что в рамках предлагаемой концепции могут быть поняты имеющиеся наблюдательные данные по интеримпульсам.

е) *Нуллиинги*. В рамках рассматриваемых представлений можно считать, что у короткопериодических пульсаров изменение интенсивности излучения может быть связано с флуктуациями числа частиц в излучающей области и с изменением их удаленности от светового цилиндра. Поскольку в области излучения всегда присутствуют частицы, полное выключение излучения — событие довольно редкое. В долгопериодических пульсарах, кроме флуктуаций числа излучающих частиц, может происходить полное выключение основного механизма генерации излучения, который, по современным представлениям, связан с образованием электрон-позитронных пар и должен работать все менее и менее эффективно с увеличением периода [18]. Поэтому у долгопериодических пульсаров время молчания должно быть существенно больше, что и наблюдается.

ж) *Поляризация*. У пульсаров с большими периодами (модель полярной шапки) изменение позиционного угла вдоль среднего профиля связано с различной ориентацией силовых линий магнитного поля в пределах конуса излучения. Это изменение определяется [2] взаимным положением оси вращения, магнитного поля и луча зрения. Если луч зрения проходит через центр конуса, позиционный угол будет изменяться на 180° , если вблизи края конуса — изменения будут малы. Поэтому у долгопериодических пульсаров должна наблюдаться большая дисперсия в полном изменении позиционного угла вдоль окна. Наблюдения подтверждают этот вывод (рис. 2). У пульсаров с $P > 0.7$ с диапазон изменений составляет $0-180^\circ$.

У короткопериодических пульсаров размер окна не связан с полным раскрытием конуса открытых силовых линий и, вообще говоря, размер зоны излучения должен быть существенно меньше размеров этого конуса. Поэтому можно ожидать, что у пульсаров с короткими периодами $\Delta\theta$ будет меньше. Именно к такому выводу приводят и наблюдения.

4 *Заключительные замечания*. а) При уменьшении периода, как уже отмечалось, становится более заметной роль релятивистских эффектов и магнитосфере пульсара. По-видимому, при $0.3 \text{ с} < P < 1 \text{ с}$ играют роль оба механизма, и свойства пульсаров при этом наиболее запутанны. Поэтому для выявления свойств «чисто смитовских» пульсаров нужно ограничиться пульсарами с $P < 0.3 \text{ с}$, а для пульсаров, описываемых моделью Рудермана—Сазерленда, $P > 1 \text{ с}$. Из 321 пульсара, приведенного в [2], у 41 $P < 0.3 \text{ с}$, у 98 — $P > 1 \text{ с}$.

б) Различие механизмов излучения, предложенное для объяснения наблюдаемых различий в свойствах короткопериодических и долгопериодических пульсаров, должно проявиться и в других наблюдаемых характеристиках этих объектов (микроструктура, временное поведение индивидуальных импульсов и т. п.). Желательны поэтому направленные исследования возможно большего числа пульсаров с этой точки зрения.

в) При рассмотрении интеримпульсов считалось, что излучение выходит с двух полюсов нейтронной звезды. При этом расстояние между главным импульсом и интеримпульсом должно составлять 180° . В реальных пульсарах это расстояние заключено в пределах 145° — 180° [2]. Отличие от 180° может быть вызвано целым рядом причин и, в частности, тем, что ось диполя не проходит через ось вращения пульсара. Тогда расстояние интеримпульса от главного импульса может быть от 0° до 180° . Поэтому, если наблюдаемое отличие от 180° связано именно с этой причиной, то во всех реальных пульсарах ось диполя проходит очень близко от оси вращения нейтронной звезды.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам группы исследования пульсаров ФИАН за полезные замечания при обсуждении результатов работы.

Физический институт
им. П. Н. Лебедева АН СССР

TWO TYPE OF PULSARS?

I. F. MAL'OV, S. A. SULEYMANOVA

Some evidence is presented that a number of observational characteristics of pulsar radio emission, for example, pulse width, total change of position angle of linear polarization through integrated profile and some others is different for two groups of pulsars. It is supposed that two alternative models are realized: the Smith's model for short period pulsars ($P \leq 0.3$ s) and Ruderman-Sutherland's model for pulsars with long periods ($P > 1$ s).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Шварцман, Изв. ВУЗов—Радиофизика, 13, 1852, 1970.
2. Р. Манчестер, Дж. Тейлор, Пульсары, Мир, М., 1980.
3. R. N. Manchester, A. G. Lyne, M. N., 181, 761, 1977.
4. R. T. Ritchings, M. N., 176, 249, 1976.
5. В. И. Изяскова, И. Ф. Малов, Письма АЖ, 5, 393, 1979.

6. V. V. Zheleznyakov, *Astrophys. Space Sci.*, **13**, 87, 1971.
7. В. А. Извекова, И. Ф. Малов, В. М. Малофеев, *Письма АЖ*, **3**, 442, 1977.
8. M. A. Ruderman, P. G. Sutherland, *Ap. J.*, **196**, 51, 1975.
9. И. Ф. Малов, *Астрофизика*, **16**, 751, 1980.
10. I. F. Malov, V. M. Malofeev, *Astrophys. Space Sci.*, **78**, 73, 1981.
11. R. A. Hamilton, P. M. McCulloch, J. G. Ablea, M. M. Komisaroff, *M. N.*, **180**, 1, 1977.
12. R. N. Manchester, *Ap. J., Suppl. ser.*, **199**, 23, 283, 1971.
13. A. G. Lyns, F. G. Smith, D. A. Graham, *M. N.*, **153**, 337, 1971.
14. Ф. Г. Смит, *Пульсары*, Мир, М., 1979.
15. D. C. Backer, J. Rankin, *Ap. J., Suppl. ser.*, **42**, 143, 1980.
16. А. И. Цыган, *Письма АЖ*, **3**, 531, 1977.
17. J. H. Taylor, R. N. Manchester, *A. J.*, **80**, 794, 1975.
18. J. Arons, *Space Science Rev.*, **24**, 437, 1977.