

ОСОБЕННОСТИ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ РАДИОПУЛЬСАРОВ

И.Ф.МАЛОВ

**Пушинская радиоастрономическая
обсерватория АКЦ ФИАН**

- **Проведен анализ параметров радиопульсаров с периодами $P > 5$ с.**
- **Обнаружено, что на диаграмме $\{dP/dt-P\}$ нет явной зависимости между этими двумя параметрами. Отсутствие такой зависимости может быть объяснено в рамках дисковой модели.**
- **Показано, что длительность импульса в рассматриваемой выборке убывает с увеличением периода. Такая зависимость противоположна зависимости, обычно используемой в моделях магнитосферы. Она свидетельствует о том, что расстояние от поверхности нейтронной звезды до области генерации радиоизлучения в исследуемой популяции зависит от периода, или что магнитное поле в области генерации обладает недипольной структурой.**
- **Рассмотрена возможность объяснения самых длинных интервалов между последовательными импульсами в пульсарах J0901-4046 и J0250+5854 влиянием дрейфовых волн на периферии магнитосферы. В рамках дрейфовой модели вычисленные периоды вращения в этих пульсарах оказываются в несколько раз короче наблюдаемых межимпульсных интервалов**

Открытие радиопульсаров J0250+5854 и J0901-4046 с периодами $P = 23.5$ с [С.М. Tan et al., ApJ, 866, 54 (2018)] и 75.9 с [М. Caleb et al., Nature Astronomy, 6, 828 (2022) (ArXiv: 2206.01346)] заставляет обратиться к анализу особенностей радиопульсаров с очень длинными периодами.

Здесь мы предлагаем обсудить свойства радиопульсаров с периодами $P > 5$ с, вошедших в пополняемый каталог ATNF **R.N. Manchester et al., Astron. J., 129, 1993 (2005)**. В версии этого каталога (1.71) насчитывается 54 пульсара с периодами в рассматриваемом интервале.

Пульсар J0901-4046 будет еще одним источником в исследуемой выборке.

Положение исследуемых пульсаров на диаграмме $\{dP/dt - P\}$

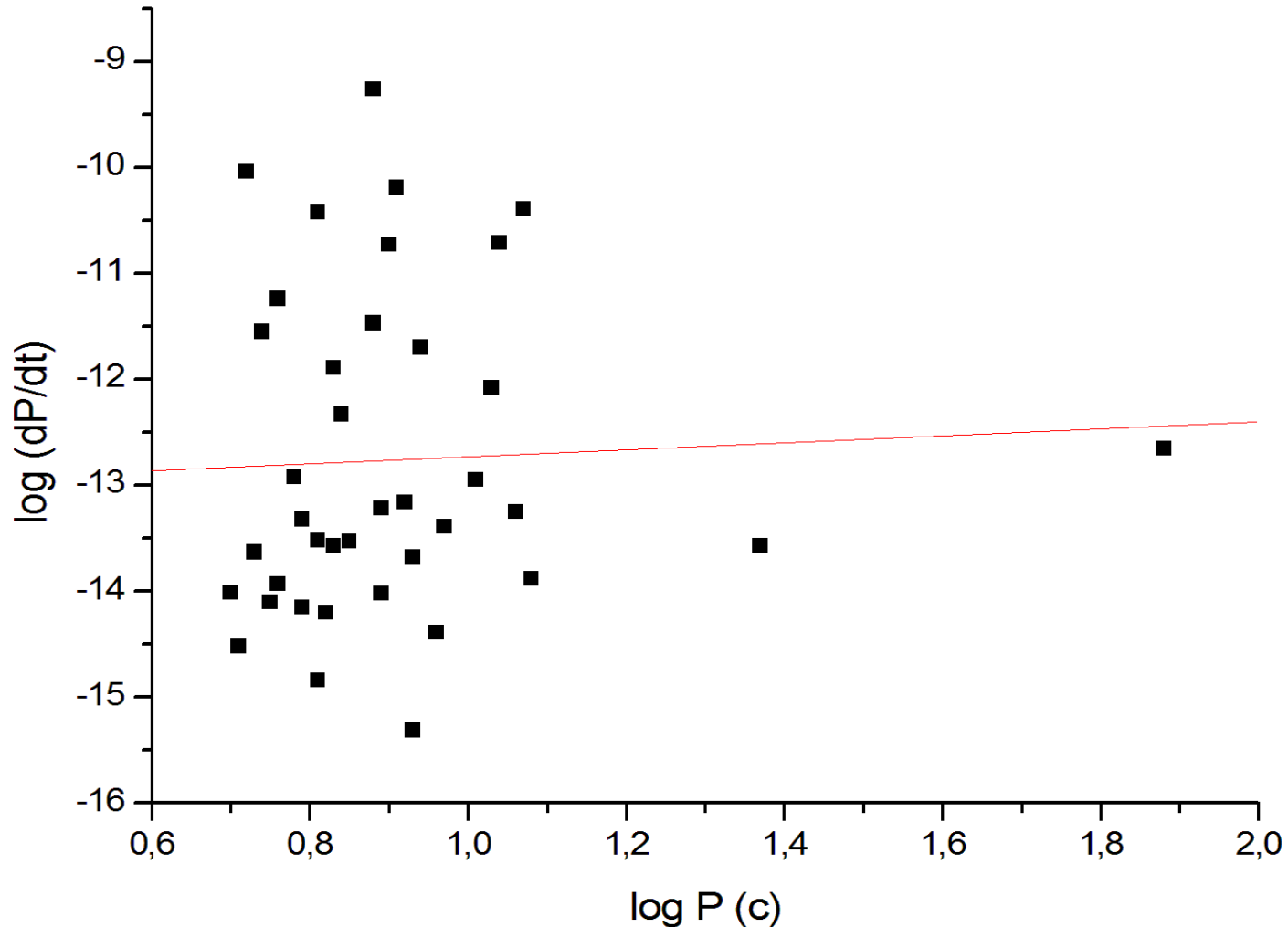


Рис. 1. Диаграмма $\{dP/dt - P\}$ для пульсаров с $P > 5$ с.

Формальное вписывание прямой на приведенной диаграмме дает:

$$\lg dP/dt = (0.25 \pm 1.19) \lg P - 12.97 \pm 1.11 \quad (1)$$

при коэффициенте корреляции $K = 0.03$ и вероятности случайного распределения $p = 0.83$.

Среди известных механизмов торможения вращения пульсаров только в дисковой модели, предполагающей наличие вещества вокруг пульсара, которое влияет на структуру магнитосферы, dP/dt не зависит от P .

В этой модели скорость потерь энергии вращения описывается уравнением:

$$-I\Omega d\Omega/dt = \frac{\pi B^2 \Omega^3 R^6}{3GM} \quad (2)$$

Здесь G - гравитационная постоянная, M - масса центральной нейтронной звезды, $\Omega = 2\pi/P$ - угловая скорость вращения нейтронной звезды. Из (2) следует, что

$$dP/dt = \frac{2\pi^2 B^2 R}{3IGM} \quad (3)$$

т. е. действительно dP/dt не зависит от P .

Принимая стандартные значения $I = 10^{45}$ г см²,
 $R = 10^6$ см и $M = 1.4M_{\odot} = 2.8 \times 10^{33}$ г, получим

$$\mathbf{dP/dt = 3.5 \times 10^{-35} \text{ В}^2} \quad \mathbf{(4)}$$

Для рассматриваемых пульсаров значения dP/dt находятся в интервале от 4.96×10^{-16} до 5.49×10^{-10} . В этой популяции согласно (4) магнитные поля должны быть в диапазоне от 3.75×10^9 до 3.95×10^{12} Гс.

Полученные значения полей находятся в пределах (от 1.9×10^7 до 2.06×10^{15} Гс), которые характерны для приведенных в каталоге ATNF объектов и получены на основе модели магнито-дипольного торможения для основной популяции пульсаров.

Зависимость ширины наблюдаемого импульса от периода пульсара

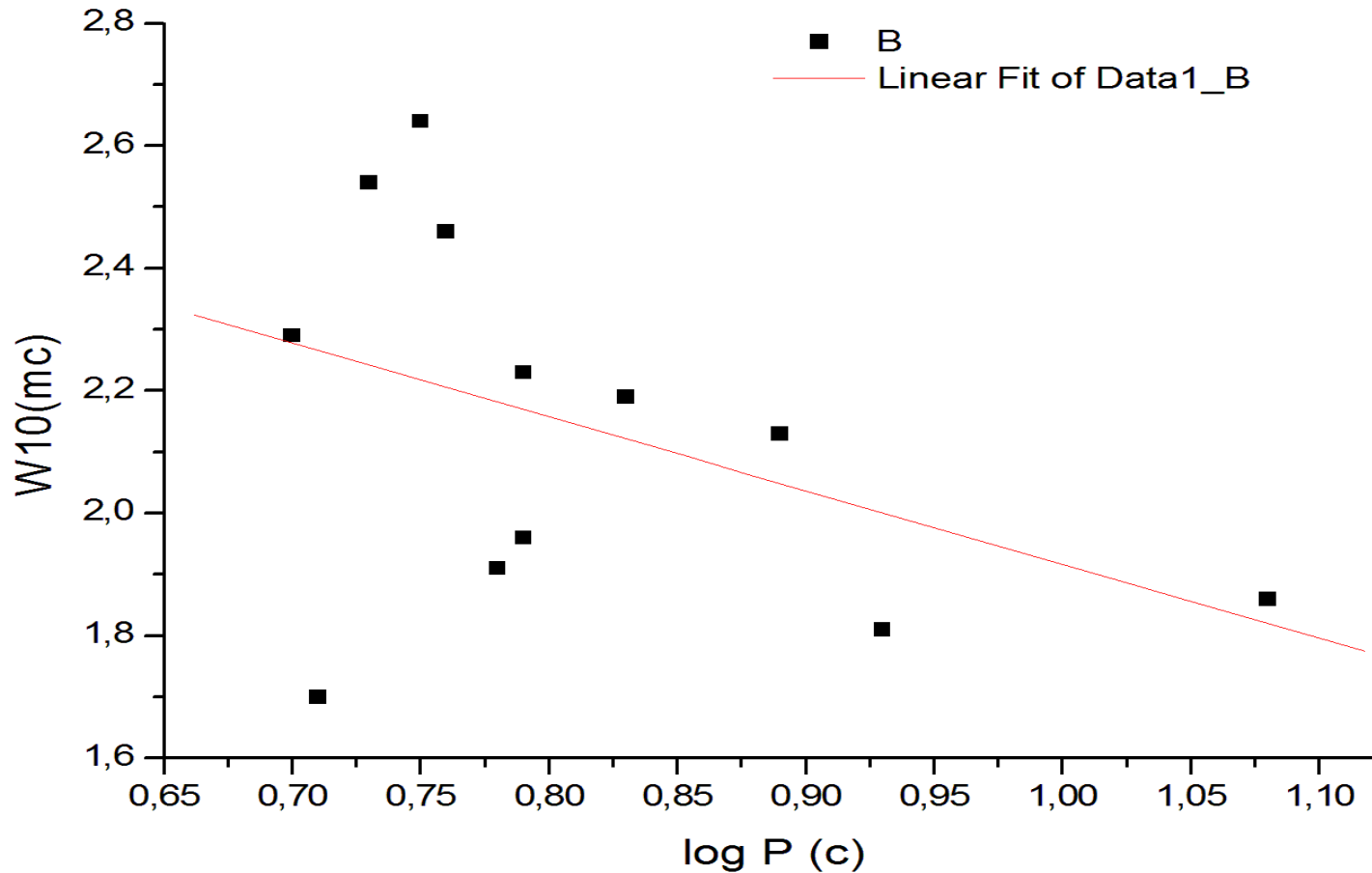


Рис. 2. Зависимость ширины импульса от периода для пульсаров с $P > 5$ с.

Еще одной особенностью пульсаров с длинными периодами оказывается зависимость наблюдаемой ширины импульса по уровню 10% W_{10} от периода (рис.2). Эта зависимость

$$\lg W_{10} = -(1.20 \pm 0.79) \lg P + 3.12 \pm 0.65 \quad (K=0.43, p=0.16) \quad (5)$$

не согласуется с известной положительной корреляцией между W_{10} и P , вытекающей из представлений о формировании импульса в пределах открытых силовых линий дипольного поля:

$$W^0 \approx 2 (r/r_{lc})^{-1/2} \propto P^{-1/2} \quad (6)$$

или во временной мере

$$W(\text{мс}) \propto P^{1/2} \quad (7)$$

Наблюдаемое расхождение может быть объяснено тем, что в выражении (6) расстояние r , на котором генерируется излучение, зависит от периода P . Для согласования с наблюдениями эта зависимость должна быть очень сильной:

$$r \propto P^{-3.4} \quad (8)$$

для пульсаров J0250+5854 и J0901-4046 при этом следует, что излучение генерируется на расстояниях $r \sim 9.4 \times 10^{-4} r_{lc}$ и $2.6 \times 10^{-4} r_{lc}$, соответственно (десятки радиусов R от поверхности нейтронной звезды).

Более вероятной причиной наблюдаемой особенности в зависимости $W_{10}(P)$ может быть недипольность магнитного поля. При квадрупольном поле силовая линия в сферических координатах описывается уравнением (рис. 3):

$$\sin^2\theta |\cos \theta| = A_1 r^2 \quad (9)$$

Максимумы на силовой линии квадрупольного поля соответствуют $\cos^2\theta = 1/3$ (углам $\theta \approx 55^\circ, 125^\circ, 235^\circ$ и 305°). Для силовой линии, касающейся светового цилиндра,

$A_1 = 1/(2.6 r_{lc}^2)$, а ширина импульса на одном из полюсов

$$W^0 \approx 2 \times 1.6 \times 57.3 r/r_{lc} = 2\pi r/cP \times 183.4 \propto 1/P \quad (10)$$

Оказывается, что ширина импульса, генерируемого на поверхности, при дипольной геометрии на два порядка больше, чем при квадрупольном поле. Это существенно ослабляет требования на зависимость $r(P)$ по сравнению с (8):

$$r \propto P^{-1.2} \quad (11)$$

Однако и в этой геометрии излучение должно генерироваться на расстояниях

$$r \sim 0.01 r_{lc}.$$

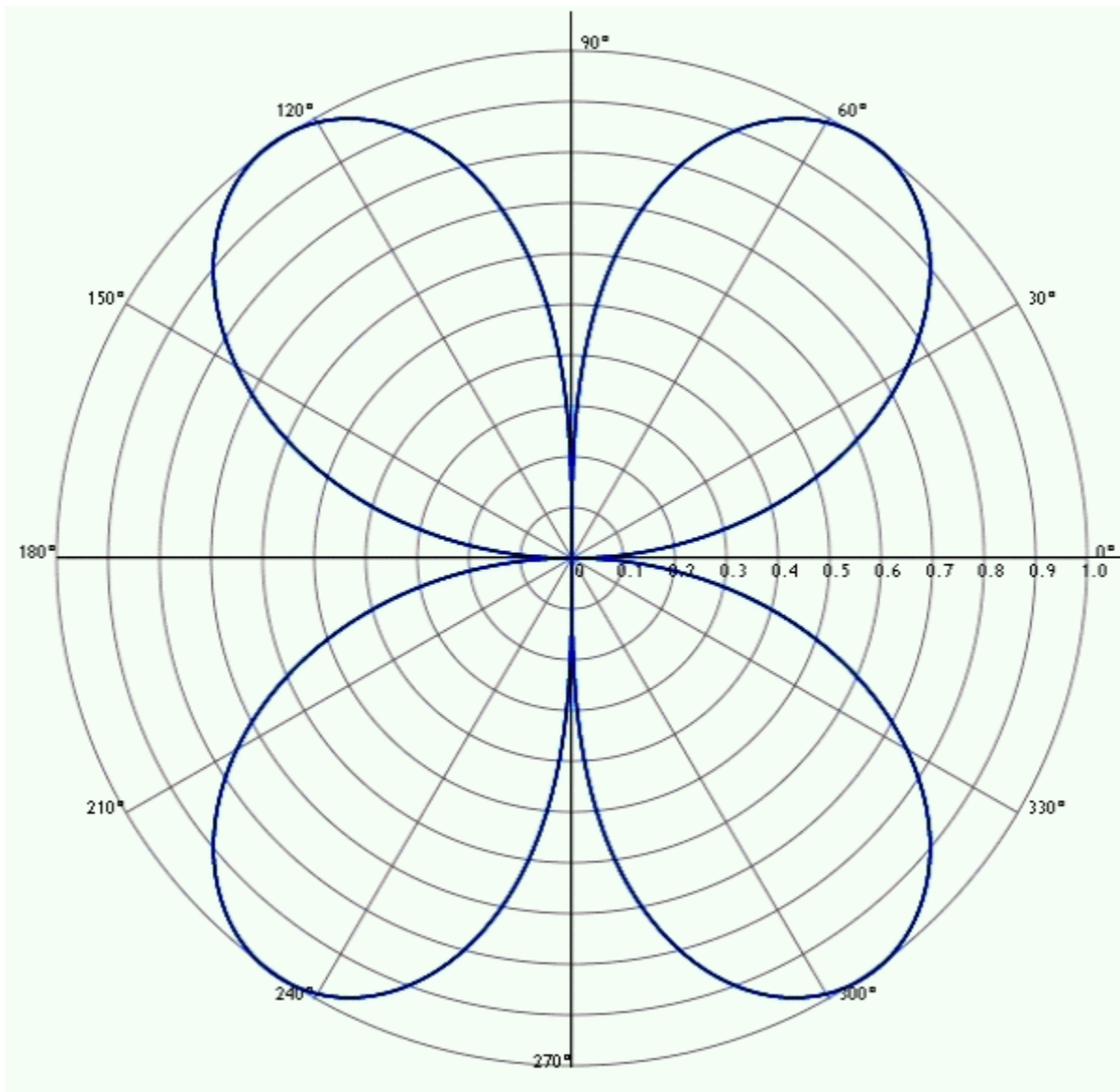


Рис. 3. Силовые линии квадрупольного магнитного поля, касающиеся светового цилиндра. Указаны значения r/r_c и угла θ .

Долгопериодические пульсары в дрейфовой модели

Релятивистские частицы, движущиеся от поверхности к периферии магнитосферы, подвержены дрейфу поперек силовых линий магнитного поля. Наличие дрейфа приводит к возбуждению волн, движущихся поперек этих силовых линий. Дрейфовые волны циркулируют вокруг силовых линий на периферии магнитосферы и черпают свою энергию от движущихся вдоль силовых линий релятивистских частиц. Инкремент волн невелик, однако сами волны находятся в резонансной области в течение длительного времени, и, хотя частицы очень быстро покидают эту область, они постоянно замещаются новыми частицами, и волны накапливают достаточно большую энергию.

Долгопериодические пульсары в дрейфовой модели

Амплитуда волн нарастает до тех пор, пока не начнут действовать нелинейные процессы. Основным при этом оказывается индуцированное рассеяние волн на частицах плазмы. Нелинейное взаимодействие накачивает энергию в длинноволновую область спектра:

$$\lambda_{\max} \approx r_{lc}. \quad (12)$$

Это условие дает возможность оценить период дрейфовых волн :

$$P_{dr} = \frac{2\pi}{\omega_{dr}} = \frac{r_{lc} e B \rho}{c^3 \gamma m_e}, \quad (13)$$

где ρ - радиус кривизны силовых линий. Величины B и ρ в (13) относятся к области формирования дрейфовых волн (окрестностям светового цилиндра).

Долгопериодические пульсары в дрейфовой модели

Поскольку дрейфовые волны циркулируют вокруг открытых силовых линий, близких к оси диполя, то для них радиус кривизны можно положить равным $\rho = r_{lc}$, и выражение для P_{dr} примет вид:

$$P_{dr} = \frac{e B P^2}{4\pi^2 c \gamma m_e} \quad (14)$$

Для пульсара с $P = 1$ с, $dP/dt = 10^{-15}$ и дипольного поля на магнитном полюсе

$$B_p = 6.4 \times 10^{19} (P dP/dt)^{1/2} \quad (15)$$

Получим

$$B \sim B_{lc} = B_p (R/r_{lc})^3 = 20 \text{ Гс}, \quad (16)$$

и, полагая $\gamma = \gamma_b = 10^6$, приходим к $P_{dr} = 9$ с. Таким образом, период дрейфовых волн в этом случае оказывается приблизительно на порядок больше периода вращения.

Долгопериодические пульсары в дрейфовой модели

Энергия дрейфовых волн за счет индуцированного рассеяния на частицах может трансформироваться в излучение вдоль открытых силовых линий, которое попадает к наблюдателю с периодом дрейфовых волн. При этом возможна модуляция наблюдаемого излучения в виде, показанном на рис. 4. Это предполагает, что наблюдаемые импульсы должны состоять из нескольких компонентов, интервалы между которыми соответствуют периоду вращения пульсара, а расстояния между последовательными импульсами равны основному периоду дрейфовых волн. Детальную структуру индивидуальных импульсов у большей части пульсаров рассматриваемой выборки еще предстоит исследовать.

Долгопериодические пульсары в дрейфовой модели

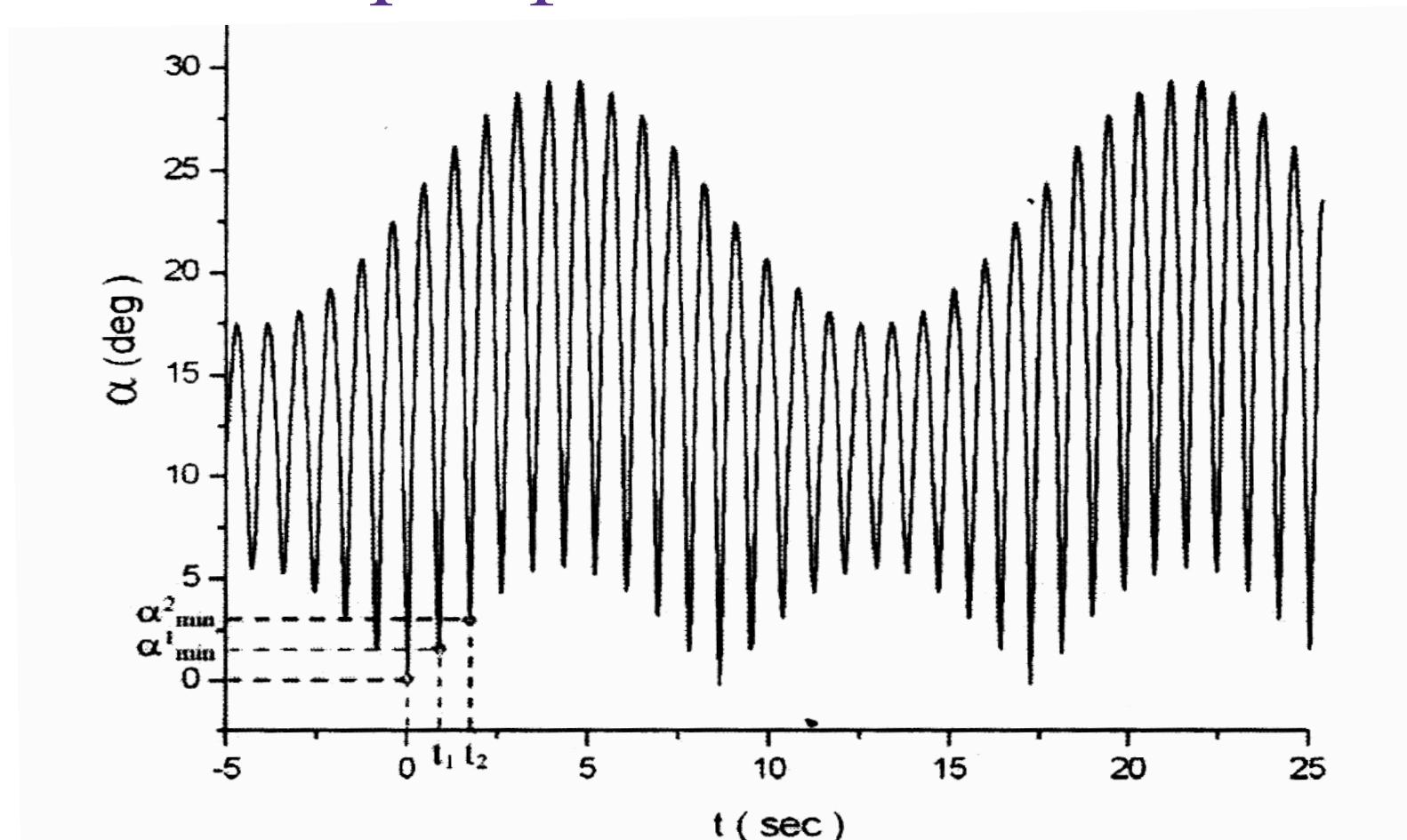


Рис. 4. Картина осциллирующего излучения при $\omega_{\text{dr}} = 2\pi/17\text{c}^{-1}$, $\Omega = 2\pi/0.85\text{c}^{-1}$, t_1 и t_2 соответствуют двум последовательным периодам вращения $P = 2\pi/\Omega$.

Долгопериодические пульсары в дрейфовой модели

Применим дрейфовую модель к двум пульсарам с самыми длинными периодами J0250+5854 и J0901-4046. В этой модели наблюдаемый интервал между последовательными импульсами

$$P_{\text{obs}} = P_{\text{dr}} = mP. \quad (17)$$

Здесь P - период вращения центральной нейтронной звезды, m - неизвестное целое число. Наблюдаемая производная периода

$$dP_{\text{obs}}/dt = m dP/dt. \quad (18)$$

Приведенные в каталоге ATNF значения индукции магнитного поля

$$B_{\text{surf}} = 3.2 \times 10^{19} (P_{\text{obs}} dP_{\text{obs}}/dt)^{1/2} \quad (19)$$

должны быть подкорректированы с учетом (17) и (18):

$$B = B_{\text{surf}} / m \quad (20)$$

Долгопериодические пульсары в дрейфовой модели

В качестве третьего уравнения для трех неизвестных P , dP/dt и m используем уравнение линии смерти из

К. Chen & M. Ruderman, ApJ, 402, 264 (1993):

$$7 \lg B_{dl} - 13 \lg P = 78, \quad (21)$$

где B_{dl} - поле на линии смерти. Для того, чтобы пульсар находился выше линии смерти, необходимо $B > B_{dl}$. Для этого нужно выполнить условие:

$$6 \lg m \geq 78 - 7 \lg B_{surf} + 13 \lg P_{obs}. \quad (22)$$

Для PSR J0901-4046 получаем $m \geq 4$, для PSR J0250+5854 $m \geq 2$.

Минимальные значения m , удовлетворяющие этим условиям $m = 5$ для первого пульсара и $m = 3$ для второго.

Долгопериодические пульсары в дрейфовой модели

При этих величинах m параметры указанных пульсаров должны иметь значения, представленные в таблице.

Реальные значения m должны быть больше минимальных.

Для подтверждения модели дрейфовых волн следует обнаружить и проанализировать тонкую структуру наблюдаемых импульсов, по которым можно будет оценить величины m .

Долгопериодические пульсары в дрейфовой модели

Таблица. Параметры двух пульсаров в дрейфовой модели.

PSRJ	m	P	dP/dt	ν_p	\dot{E}	B_{lc}
		(с)		(Гц)	(эрг/с)	(Гц)
J0901-4046	5	15.18	4.5E-14	5.26E+13	5.26E+29	0.14
J0250+5854	3	7.85	9.05E-15	1.71E+13	7.39E+29	0.32

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ параметров радиопульсаров с периодами $P > 5$ с.

Обнаружено, что на диаграмме $\{dP/dt - P\}$ нет явной зависимости между этими двумя параметрами. Отсутствие такой зависимости может быть объяснено в рамках дисковой модели, предполагающей наличие вещества вокруг пульсара, взаимодействие которого с его магнитосферой определяет основной механизм торможения вращения центральной нейтронной звезды вместо магнитодипольного излучения. Регулярный поиск реликтовых или нагребенных дисков вокруг пульсаров, насколько нам известно, не проводился.

Однако часть исследованных объектов находится в остатках сверхновых, а около 4U0142+61 с помощью инфракрасных наблюдений обнаружили реликтовый диск **Z. Wang, D. Chakrabarty, D.L. Kaplan, Nature, 440, 772 (2006). (Astro-ph/0604076).**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что ширина импульса в рассматриваемой выборке убывает с увеличением периода, что противоположно положительной корреляции, характерной для основной массы радиопульсаров. Такое поведение наблюдаемой ширины может быть связано с зависимостью положения уровня генерации радиоизлучения от периода или с недипольной структурой магнитного поля.

Рассмотрена возможность объяснения самых длинных интервалов между последовательными импульсами в пульсарах J0901-4046 и J0250+5854 влиянием на их формирование дрейфовых волн на периферии магнитосферы. В рамках дрейфовой модели вычисленные периоды вращения в этих пульсарах оказываются в несколько раз короче наблюдаемых межимпульсных интервалов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!