

УДК 524.354.4

ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ И УГЛЫ
МЕЖДУ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ И МАГНИТНЫМ ДИПОЛЕМ
В ПУЛЬСАРАХ

И. Ф. МАЛОВ

Поступила 26 марта 1982

Принята к печати 6 ноября 1982

В рамках модели полярной шапки при спадающем к краям электрическом поле в зоне ускорения вычислены профили импульсов и проведено их сравнение с наблюдениями для 17 пульсаров. Получены оценки энергии излучающих электронов и уровней генерации излучения. С использованием поляризационных данных определены углы наклона (θ) магнитного поля к оси вращения нейтронной звезды. Оказалось, что у пульсаров с интеримпульсами $\theta \lesssim 10^\circ$ или $\theta \gtrsim 80^\circ$. Это позволяет в рамках использованной модели судить о наличии интеримпульса у пульсара по измерениям среднего профиля и позиционного угла.

1. *Введение.* В рамках модели полярной шапки, предполагая, что излучение на каждом уровне генерируется в узкой полосе частот, можно оценить энергию излучающих электронов и угловое расстояние луча зрения относительно центра конуса излучения [1]. Кроме того, использование данных о ходе позиционного угла линейной поляризации вдоль среднего профиля дает возможность вычислить угол наклона магнитного диполя к оси вращения пульсара [2]. Однако, как показано в [1], модель типа модели Рудермана—Сазерленда [3] с однородным электрическим полем в зазоре дает очень крутые внешние фронты у профилей. В настоящей работе используется распределение ускоряющего электрического потенциала, полученное в [4]. При этом вычисленные профили импульсов оказываются значительно ближе к наблюдаемым, чем профили, приведенные в [1]. Сравнение расчетов с данными наблюдений позволило оценить энергии электронов и уровни генерации излучения, а также углы между осью вращения и магнитным полем на данном уровне для 17 пульсаров.

2. *Профили импульсов.* В работе [1] при вычислениях профилей электрическое поле в области ускорения считалось не зависящим от угла. Фоли и др. [4] исследовали стационарное ускорение зарядов вблизи поверхности нейтронной звезды и получили самосогласованное решение для

ускоряющего потенциала Φ в модели полярной шапки для соосного ротора. Оказалось, что существует сильная зависимость $\Phi(\theta)$:

$$\Phi(\theta) = \frac{8\pi}{P} \sqrt{\frac{m_e R_s^3 B_s}{e}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n(x_n \theta/\theta_c)}{x_n^2 I_1(x_n)} \quad (1)$$

или асимптотического лоренц-фактора электронов

$$\gamma(\theta) = \frac{e\Phi(\theta)}{mc^2} = \frac{8\pi}{Pc^2} \sqrt{\frac{e R_s^3 B_s}{m_e}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_0(x_n \theta/\theta_c)}{x_n^2 I_1(x_n)} \quad (2)$$

В (1), (2) I_0 и I_1 — функции Бесселя первого рода, x_n — n -ый нуль функции $I_0(x)$, $\theta_c = \sqrt{2\pi r/cP}$ — угловой радиус конуса открытых силовых линий. На рис. 1 сплошной кривой представлена функция $f\left(\frac{\theta}{\theta_c}\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_0(x_n \theta/\theta_c)}{x_n^2 I_1(x_n)}$. При вычислениях профилей в настоящей работе использовалась аппроксимация:

$$f(x) = 0.268 - 0.253x^2 + 0.285x^4 - 0.300x^6, \quad (3)$$

которая, как видно из рис. 1, очень хорошо описывает вычисленное в [4] распределение на интервале $0 \leq x \leq 1$.

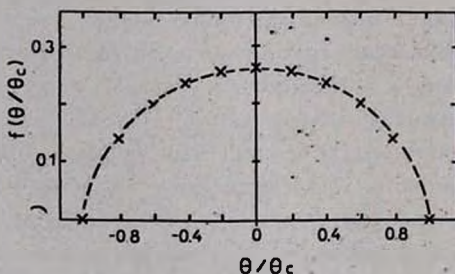


Рис. 1. Профиль электрического потенциала в заворе [4]. Крестиками показаны значения аппроксимирующего полинома (3).

Таким образом, профили импульсов рассчитывались по формуле [1]:

$$I(v, \theta) \propto \int_{-\theta_{\max}}^{\theta_{\max}} \frac{\gamma^2 \theta'}{r} \left\{ \frac{\xi^2 K_{2/3}^2(\xi) + \frac{\gamma^2 (\theta - \theta')^2}{1 + \gamma^2 (\theta - \theta')^2} \xi^2 K_{1/3}^2(\xi)}{1 + \gamma^2 (\theta - \theta')^2} \right\} d\theta', \quad (4)$$

где

$$\xi = \frac{\omega r}{3c\gamma^3} (1 + \gamma^2 \theta^2)^{3/2},$$

ρ — радиус кривизны силовой линии $\theta_{\max} = (3/2)\theta_c$, а γ , в отличие от принятого в [1] $\gamma = \text{const}$ теперь является функцией угла и определяется выражениями (2) и (3). На рис. 2 для сравнения приведены профили, вычисленные при $\gamma = \text{const}$ и $\gamma = \gamma_0 f(\theta/\theta_c)$ и при равных значениях других параметров. Из этого рисунка видно, что профиль $\gamma = \gamma_0 f(\theta/\theta_c)$ качественно значительно лучше описывает реально наблюдаемые профили пульсаров.

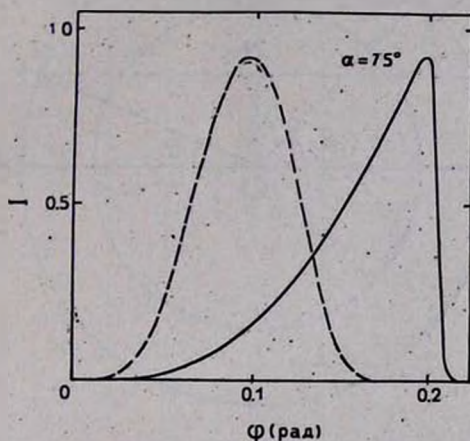


Рис. 2. Профили импульсов, вычисленные при $\gamma = 500 = \text{const}$ (сплошная кривая) и при $\gamma = 1900 f(\theta/\theta_c)$ (пунктир) для $\nu = 410$ МГц и $P = 3.745$.

При вычислениях профилей учитывалась геометрия прохождения луча зрения через конус излучения (рис. 3). Из выражения (4) следует, что вычисленный профиль будет симметричным, поэтому численный счет проводился только для положительных θ от $\theta_c \sin \alpha$ до θ_c . В наблюдаемом профиле угол θ соответствует углу $\varphi \approx 3/2 \sqrt{\theta^2 - \theta_c^2 \sin^2 \alpha}$.

3. *Результаты.* Проведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы.

а) В модели, использованной в настоящей работе, максимум интенсивности оказывается значительно ближе к центру профиля, чем в профилях работы [1]. Этот результат если и не устраняет полностью, то значительно снижает трудность модели полого конуса, связанную с предсказывавшимся ранее недопустимо малым числом однокомпонентных профилей по отношению к числу двухкомпонентных профилей [5].

б) Как показали расчеты, при увеличении γ_0 максимум интенсивности удаляется от центра профиля (для неизменных значений других параметров). При увеличении α максимум приближается к центру импульса и

для некоторого значения α_0 профиль становится однокомпонентным при всех $\alpha > \alpha_0$. Такое поведение вычисленных профилей позволяет вписыванием их в наблюдаемые профили с помощью метода наименьших квадратов подобрать значения γ_0 и α , которые соответствуют наилучшему согласию данных расчетов и наблюдений.

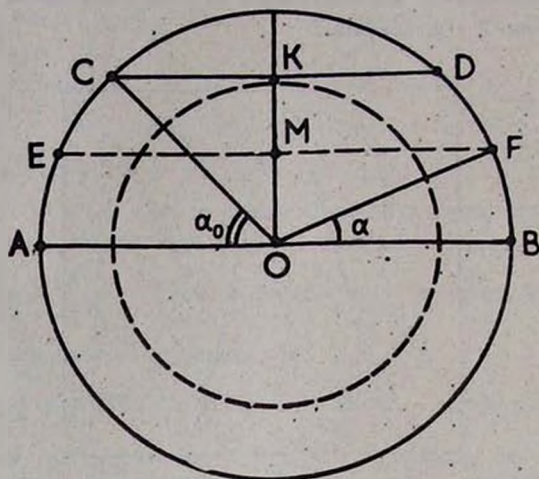


Рис. 3. Положение луча зрения относительно центра конуса излучения. Пунктир—геометрическое место максимумов интенсивности.

Как уже отмечалось, вычисленные профили симметричны относительно центра импульса. Наблюдаемые двухкомпонентные профили, как правило, не являются симметричными. Возможные причины такого поведения обсуждались в работе [1]. Здесь мы подгоняем значения параметров на основе сравнения данных вычислений со структурой компонента с большей интенсивностью.

На рис. 4 приведены примеры вычисленных профилей в сравнении с данными наблюдений. Полученные в результате проведенного сравнения значения γ_0 и α указаны в табл. 1. Как следует из этой таблицы, энергия излучающих электронов не зависит от величины периода.

Используя данные о ширинах наблюдаемых профилей φ_0 , можно оценить ширину конуса излучения $\theta_c \approx (2/3) \varphi_0 / \cos \alpha$ и уровень генерации излучения $r = (cP/2\pi) \theta_c^2$. В табл. 1 и на рис. 5 приведены определенные таким способом значения r/R_L , где $R_L = cP/2\pi$ — радиус светового цилиндра. При уменьшении периода r/R_L увеличивается, и для пульсаров с $P < 0.5$ с $r/R_L \gtrsim 0.1$, т. е. в этих пульсарах должны быть заметными релятивистские эффекты, что на основе других соображений уже отмечалось в работе [6].

Таблица 1

PSR	P (с)	ν (МГц)	θ_c (рад)	α (рад)	r/R_L	$\xi^\circ - \beta^\circ$	β°	γ_0°
0525+21	3.745	410	0.128	0.1	0.016	0.8	34	1870
0531+21*	0.033	1664	0.289	1.35	0.084	-16.0	85	10300
0628-28	1.244	649	0.299	0.5	0.089	- 8.2	32	1610
0740-28	0.167	631	0.232	0.8	0.059	- 9.5	31	1200
0823+26*	0.531	421	0.099	0.6	0.010	3.1	85	750
0950+08*	0.253	410	0.271	0.6	0.073	- 6.8	13	790
1055-52*	0.197	631	0.333	0.3	0.111	5.6	10	1270
1133+16	1.188	410	0.058	0.3	0.010	1.7	22	970
1154-62	0.401	631	0.184	0.7	0.034	- 6.8	16	2490
1240-64	0.388	631	0.195	0.6	0.038	6.3	31	1030
1449-64	0.179	631	0.195	0.6	0.038	6.3	23	780
1556-44	0.257	631	0.170	0.6	0.029	- 5.5	33	970
1747-46	0.742	631	0.138	0.5	0.019	- 3.5	~90	1210
1818-04	0.598	631	0.105	0.7	0.011	3.9	47	1510
1822-09*	0.769	631	0.096	0.6	0.009	3.1	7	1300
1929+10*	0.226	1665	0.215	0.5	0.047	- 5.2	8	580
2021+51	0.529	392	0.155	0.3	0.024	2.6	9	950

* Значение энергии электронов в центре импульса $\gamma_{\max} = 0.268 \gamma_0$.

Если луч зрения и магнитный диполь составляют с осью вращения углы ξ и β , соответственно, то, как следует из рис. 3, $MO = \xi - \beta$. Тогда, учитывая малость углов $\xi - \beta$ и θ_c , получим

$$\xi - \beta = \theta_c \sin \alpha. \quad (5)$$

Второе соотношение между β и ξ может быть найдено из данных о ходе позиционного угла линейной поляризации вдоль среднего профиля [7]:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \beta \sin \varphi}{\sin \xi \cos \beta - \cos \xi \sin \beta \cos \varphi}, \quad (6)$$

где ψ — позиционный угол, соответствующий в профиле углу φ .

При вычислениях угла наклона магнитного диполя к оси вращения (β) были использованы поляризационные данные, полученные на частотах 410, 630 и 1665 МГц [8—10]. Соответствующие значения β приведены в табл. 1. На рис. 6 даны примеры хода позиционного угла ψ по среднему профилю для вычисленных значений параметров. Оказалось, что β принимает значения почти во всем диапазоне от 0 до 90° и не зависит от периода. Следовательно, если величина периода связана с возрастом пуль-

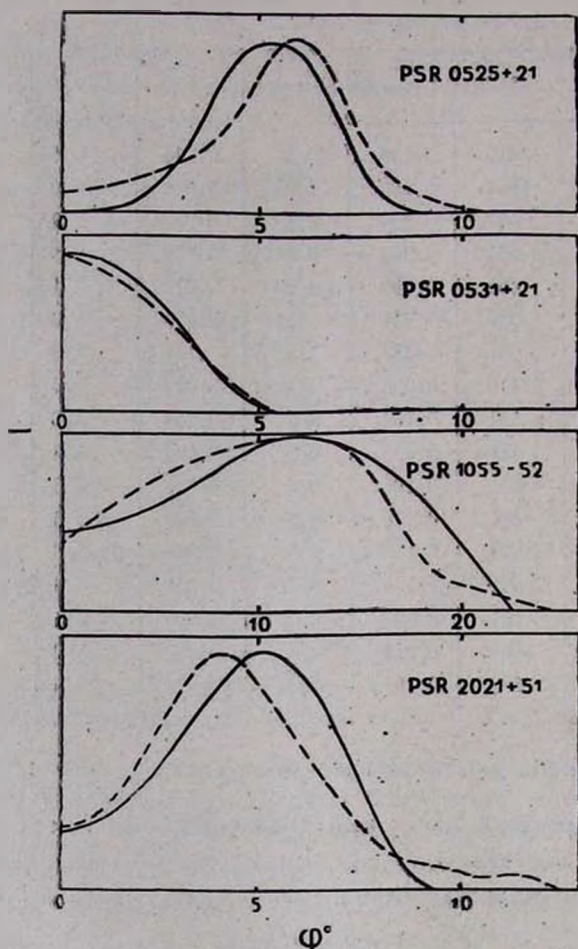


Рис. 4. Вычисленные профили импульсов (сплошные кривые) в сравнении с данными наблюдений (пунктир).

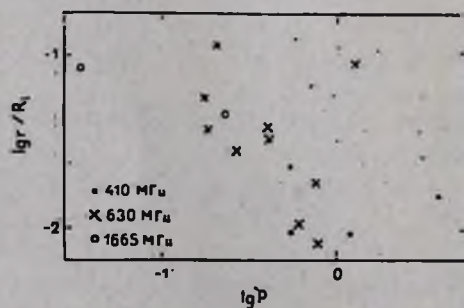


Рис. 5. Наблюдаемая зависимость относительного уровня генерации излучения от периода.

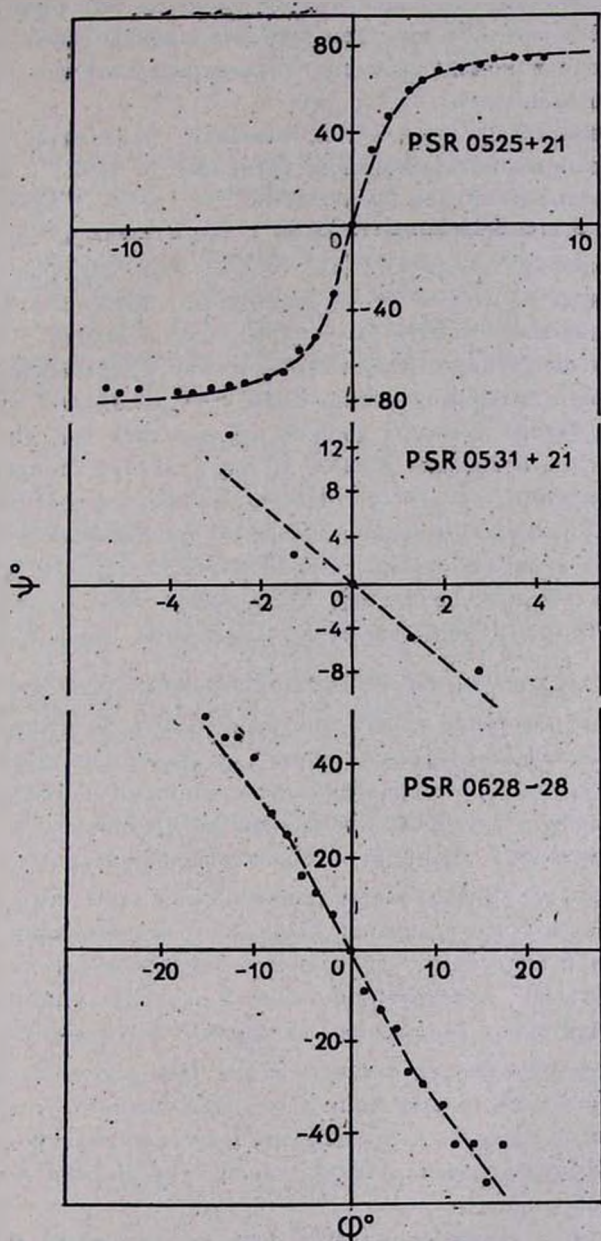


Рис. 6. Вычисленный (пунктир) и наблюдаемый (точки) ход позиционного угла вдоль среднего профиля.

сара, то заметного выравнивания осей в процессе эволюции пульсара не происходит. Если же пульсары рождаются с произвольным периодом, то и магнитное поле в момент рождения пульсара составляет произвольный угол с его осью вращения.

Особый интерес представляет применение предложенной методики к пульсарам, имеющим интеримпульсы (отмечены в табл. 1 звездочками). Оказалось, что интеримпульс наблюдается как в случае перпендикулярности оси диполя и оси вращения ($\beta > 80^\circ$), так и тогда, когда направления этих осей близки друг к другу ($\beta \lesssim 10^\circ$). В первом случае наблюдатель видит оба полюса, во втором — два положения конуса излучения из одного полюса. Такая возможность уже обсуждалась в работе [11].

Исходя из полученных результатов, можно предложить метод выявления пульсаров с интеримпульсами. Если угол β мал или, наоборот, близок к 90° , то у такого пульсара должно наблюдаться два импульса за период. Из объектов, вошедших в табл. 1, три пульсара удовлетворяют указанным требованиям: у PSR 1747—46 $\beta > 80^\circ$, а у PSR 1154—62 и 2021+51 $\beta \sim 10^\circ$. Было бы крайне интересно провести поиск интеримпульсов у этих пульсаров. (В случае PSR 1154—62 $\theta < \beta$, и поэтому интеримпульса, по-видимому, не будет). Обнаружение интеримпульсов послужило бы хорошим подтверждением рассмотренных здесь представлений.

4. Выводы. В заключение перечислим основные результаты работы.

1) В модели полярной шапки при зависимости электрического потенциала от угла, описываемой выражением (3), вычислены профили импульсов для ряда пульсаров. Из сравнения их с данными наблюдений оценены энергии излучающих электронов и уровни генерации излучения. Последние ближе к световому цилиндру у короткопериодических пульсаров.

2) С учетом поляризационных данных вычислены углы наклона (β) магнитного диполя к оси вращения. Оказалось, что величина β не зависит от периода. Из 6 пульсаров, обладающих интеримпульсами, два имеют угол β , близкий к 90° , для других четырех β мало. На этом результате может быть основан метод выявления пульсаров с интеримпульсами.

3) Для более уверенных статистических выводов необходимо получение средних профилей и измерение хода позиционного угла у возможно большего числа пульсаров, что позволит более определенно судить как о природе интеримпульсного излучения, так и о применимости к пульсарам модели полярной шапки.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность Ю. В. Володину за помощь в расчетах профилей, а также З. А. Марченко и Н. В. Чурилиной за помощь при оформлении работы.

Физический институт
им. П. Н. Лебедева АН СССР

ENERGIES OF ELECTRONS AND ANGLES BETWEEN
MAGNETIC FIELD AND ROTATION AXIS IN PULSARS

I. F. MALOV.

A number of profiles was calculated on the basis of the polar cap model with electric field decreasing to the cap boundaries. The comparison of these profiles and the observable ones was made for 17 pulsars. Electron energies and levels of generation of radio emission were estimated. On the basis of polarization data the values of the angle β between magnetic field and rotation axis were obtained. The pulsars with the interpulse have $\beta \leq 10^\circ$ or $\geq 80^\circ$. This result allows to forecast pulsars with an interpulse.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Ф. Малов, *Астрофизика*, 16, 751, 1980.
2. И. Ф. Малов, *Астрон. цирку.* № 1110, 1980.
3. M. A. Ruderman, P. G. Sutherland, *Ap. J.*, 196, 51, 1975.
4. W. M. Fawley, J. Arons, E. T. Scharlemann, *Ap. J.*, 217, 227, 1977.
5. В. А. Извекова, И. Ф. Малов, В. М. Малофеев, *Письма АЖ*, 3, 442, 1977.
6. И. Ф. Малов, С. А. Сулейманова, *Астрофизика*, 18, 107, 1982.
7. Р. Манчестер, Дж. Тейлор, *Пульсары*, Мир, М., 1980.
8. R. N. Manchester, *Ap. J.*, Suppl. ser., 23, 283, 1971.
9. R. N. Manchester, *Ap. J.*, 167, L 101, 1971.
10. P. M. McCulloch, P. A. Hamilton, R. N. Manchester, J. G. Ables, *M. N. RAS*, 183, 645, 1978.
11. T. H. Hankins, J. M. Cordes, *Ap. J.*, 249, 241, 1981.