

УДК 524.354.4, 52-35, 519.654

В.А. АВДЮШЕВ, В.А. БОРДОВИЦЫН, А.А. ГРОХОВСКАЯ

ПОСТРОЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОФИЛЕЙ ИЗГИБНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ

Производится идентификация параметров наблюдаемого излучения пульсаров с помощью численного моделирования в рамках нелинейной задачи наименьших квадратов. С помощью полученных значений параметров выполняется построение профилей излучения и индикатрис углового распределения мощности мгновенного излучения для экспериментально наблюдаемых пульсаров.

Ключевые слова: профиль, пульсар, индикатриса, изгибное излучение, релятивистские частицы, метод наименьших квадратов, метод Гаусса–Ньютона, численное моделирование.

Введение

Пульсары открыты в 1967 г. в Кавендишской лаборатории под руководством Энтони Хьюиша его аспиранткой мисс Белл при изучении мерцаний квазаров, возникающих при прохождении электромагнитных волн через солнечную плазму [1]. Это открытие имело фундаментальное значение для разработки астрофизических исследований космического радиоволнового излучения.

Пульсары были ассоциированы с нейтронными звездами [2] – маленькими быстро вращающимися остатками взрывов сверхновых – и представляют собой источники импульсного строго периодического излучения, характер которого объясняется моделью маяка. Согласно этой модели, магнитная ось пульсара, вдоль которой происходит излучение, и ось вращения не совпадают между собой, что приводит к тому, что мы наблюдаем от пульсаров отдельные импульсы, а не непрерывное излучение. Если радиолуч пульсара никогда не освещает Землю, то этот пульсар остается невидимым для наблюдателей, поэтому не всякая нейтронная звезда может наблюдаться с Земли как пульсар.

В данной работе для построения периодических профилей излучения пульсаров используется универсальный кинематический метод на основе модели Радхакришнана и Кука, представленный в работе [3], согласно которой источником излучения являются потоки очень быстрых частиц (джеты), истекающих из магнитных полюсов пульсара в направлении линий напряженности магнитного поля. Идея предлагаемого здесь метода состоит в том, что профиль излучения пульсара находится как линия пересечения вращающейся вместе с пульсаром углового распределения мощности мгновенного излучения от источника, расположенного на траектории джета, с неподвижным в пространстве лучом зрения наблюдателя.

1. Индикатриса излучения произвольно движущегося релятивистского заряда

Уравнение поверхности – индикатрисы мощности мгновенного излучения – дается точной теорией излучения релятивистских заряженных частиц. Угловое распределение мощности мгновенного излучения в направлении телесного угла $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ для произвольно движущегося заряда в безразмерной форме имеет вид [4]

$$\rho(\alpha, \beta, \theta, \varphi) = \frac{1}{(1 - \beta \cos\theta)^3} + 2\beta \frac{\sin\theta \cos\varphi \sin\alpha + \cos\theta \cos\alpha}{(1 - \beta \cos\theta)^4} \cos\alpha + (1 - \beta^2) \frac{(\sin\theta \cos\varphi \sin\alpha + \cos\theta \cos\alpha)^2}{(1 - \beta \cos\theta)^5}, \quad (1)$$

где $\beta = u/c$ – скорость излучающих частиц, выраженная в частях от скорости света; α – угол между скоростью и ускорением; θ и φ – углы полярной системы координат. Выражение представлено в виде, удобном для построения профилей мгновенного излучения. Если интерпретировать его как радиус-вектор, то он будет описывать некоторую поверхность в сферической системе координат, которую мы называем индикатрисой излучения. Результатом пересечения луча зрения

наблюдателя с поверхностью индикатрисы и является профиль излучения пульсара, или временная развертка мощности излучения.

По существу, это обратная задача, решение которой не зависит изначально от той или иной модели магнитосферы пульсаров и может помочь найти реально существующую конфигурацию расположения источников излучения в наблюдаемых экспериментально пульсарах. Для идентификации построенных таким образом профилей поляризованного излучения пульсаров с экспериментально наблюдаемыми профилями предлагается использовать целый набор постоянных параметров, таких, как угол наклона магнитной оси пульсара относительно его вращения, а также углы, образованные лучом зрения с осью вращения пульсара и с направлением его магнитной оси. Кроме того, данная модель позволяет варьировать и параметры самого излучения, например, число и энергию излучающих частиц (гамма-фактор), напряженность магнитного поля и радиус кривизны траектории.

2. Метод построения профилей излучения пульсаров

На рис. 1 показана система координат пульсара вместе с джетом движущихся частиц. Так как пульсар расположен на очень большом расстоянии от Земли, он изображен в виде точки, находящейся в начале координат. Единичный вектор светового луча, попадающего к наблюдателю, обозначен $\mathbf{n} = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$. Ось вращения задается вектором $\mathbf{s} = (0, 0, 1)$. Направление магнитного момента $\boldsymbol{\mu}$ определяется единичным вектором \mathbf{k} , который вращается вокруг оси \mathbf{s} с постоянным углом отклонения η .

Луч света приходит к наблюдателю от индикатрисы углового распределения мощности излучения, которая изначально определена в нештрихованной системе координат $X'Y'Z'$ с помощью сферических углов θ и φ с плоскостью симметрии $X'Z'$, в которой расположена траектория джета. При этом плоскость джета не обязательно совпадает с плоскостью вращения магнитной оси пульсара \mathbf{k}, \mathbf{s} . В каждом конкретном случае плоскость траектории джета можно повернуть на некоторый постоянный угол λ вокруг магнитной оси, определяемый индивидуально для каждого пульсара.

Выражение из предыдущего пункта позволяет построить профили пульсаров, для которых траектория излучения заряженных частиц в момент излучения расположена в плоскости $X'Y'$, т.е. когда $\beta \parallel Z'$. Чтобы построить индикатрисы полной мощности мгновенного излучения при произвольной ориентации скорости и ускорения частицы относительно осей координат в момент излучения, необходимо перейти в систему координат пульсар – наблюдатель, сделав два левых поворота: относительно оси Y на угол η и относительно оси Z на угол λ .

В результате для углов получим следующие преобразования (рис. 1):

$$\begin{aligned} \sin \theta \cos \varphi &= [\sin \zeta \cos(\Omega t - \delta) \cos \eta - \cos \zeta \sin \eta] \cos \lambda + \sin \zeta \sin(\Omega t - \delta) \sin \lambda, \\ \sin \theta \sin \varphi &= -[\sin \zeta \cos(\Omega t - \delta) \cos \eta - \cos \zeta \sin \eta] \sin \lambda + \sin \zeta \sin(\Omega t - \delta) \cos \lambda, \\ \cos \theta &= \sin \zeta \cos(\Omega t - \delta) \sin \eta + \cos \zeta \cos \eta. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь учтено, что телесный угол $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ инвариантен при поворотах системы координат.

3. Определение параметров профилей излучения пульсаров из наблюдений

Параметры кинематической модели определялись из наблюдаемых величин мгновенной мощности излучения [5] в рамках нелинейной задачи наименьших квадратов, которая сводится к мини-

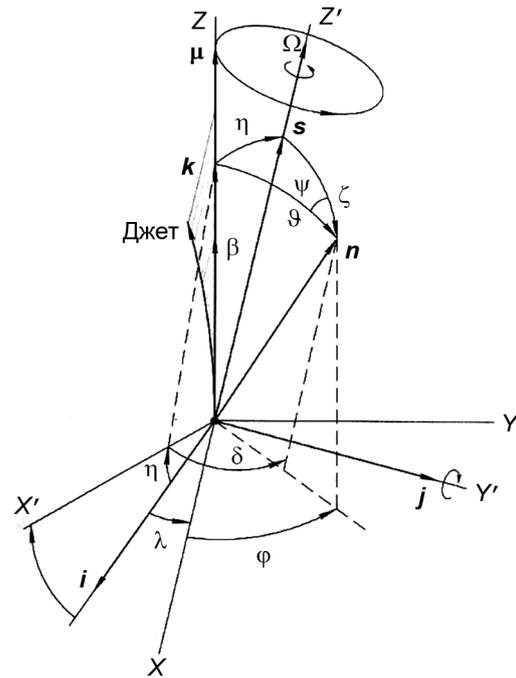


Рис. 1. Система координат наблюдатель – пульсар

мизации функционала $S(\mathbf{q}) = \|\rho^O - \rho^C(\mathbf{q})\|^2 \rightarrow \min$. Здесь $\rho^O = (\rho_1^O, \dots, \rho_N^O)^T$ и $\rho^C = (\rho_1^C, \dots, \rho_N^C)^T$ – N -мерные векторы измерений и их модельных представлений (1) с учетом преобразования координат (2) на моменты времени t_1, \dots, t_N , соответствующие угловым значениям ϕ'_1, \dots, ϕ'_N ; N – число измерений; $\mathbf{q} = (\alpha, \beta, \lambda, \eta, \theta)^T$.

Поскольку задача нелинейная, она решается численно итерационным методом Гаусса – Ньютона (при необходимости с демпфированием) [6]. Согласно методу, на каждой итерации в определяемые параметры \mathbf{q} вносится поправка $\Delta\mathbf{q} = -h\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{G}$, где $\mathbf{Q} = \mathbf{A}^T\mathbf{A}$; $\mathbf{A} = \partial\rho/\partial\mathbf{q}$; $\mathbf{G} = -\mathbf{A}^T\mathbf{B} = \partial S/\partial\mathbf{q}$; $\mathbf{B} = \rho^O - \rho^C$; $h \leq 1$ – демпфирующий множитель. При этом демпфирование применяется, когда поправки для угловых параметров становятся больше 0.01 (радиан), а для параметра β – 0.001. Итерационный процесс завершается при условии $\|\mathbf{q}\| < 10^{-8}$.

4. Сравнение с экспериментальными данными профилей пульсаров

Для подтверждения изложенной теории были получены параметры уравнения индикатрисы для ряда наблюдаемых пульсаров и построены теоретические профили их излучения, давшие хорошее совпадение с экспериментально полученными данными. На рис. 2 и 3 представлены экспериментальные данные (рис. 2, а, б и 3, а, б) [4], сравнение теоретически построенного профиля и экспериментальных данных (рис. 2, в и 3, в) и индикатрисы излучения для соответствующих параметров нейтронной звезды (рис. 2, г и 3, г). На графиках по вертикальной оси откладывается нормированное распределение полной мощности излучения по углам для произвольно движущегося релятивистского заряда. В качестве объектов, для которых производились расчеты параметров излучения, взяты пульсары PRS 2310+42 (определенные кинематические параметры модели: $\beta = 0.98999986$, $\alpha = 24.99721365^\circ$, $\lambda = 60.0102946^\circ$, $\eta = 12.0001117^\circ$, $\theta = 15.0000547^\circ$) и PRS

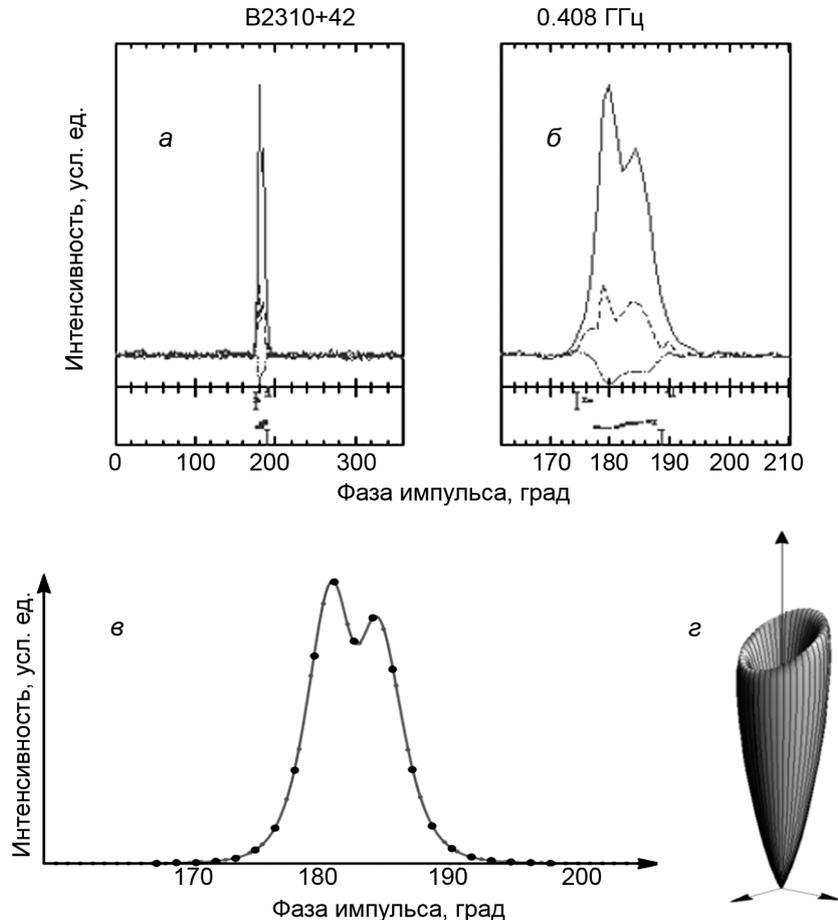


Рис. 2. PSR 2310+42: а, б – экспериментальный средний профиль; в – сравнение теоретического профиля пульсара (сплошная кривая) с экспериментально наблюдаемым профилем (точки); г – индикатриса пульсара, построенная для полученного набора параметров

0655+64 (определенные кинематические параметры модели: $\beta = 0.990000003$, $\alpha = 9.990358837^\circ$, $\lambda = 60.1069155898^\circ$, $\eta = 14.00028^\circ$, $\theta = 11.00007248^\circ$). При определении параметров пульсаров итерационный процесс сходился не более чем на 20 шаге для каждого пульсара при хорошем начальном приближении параметров.

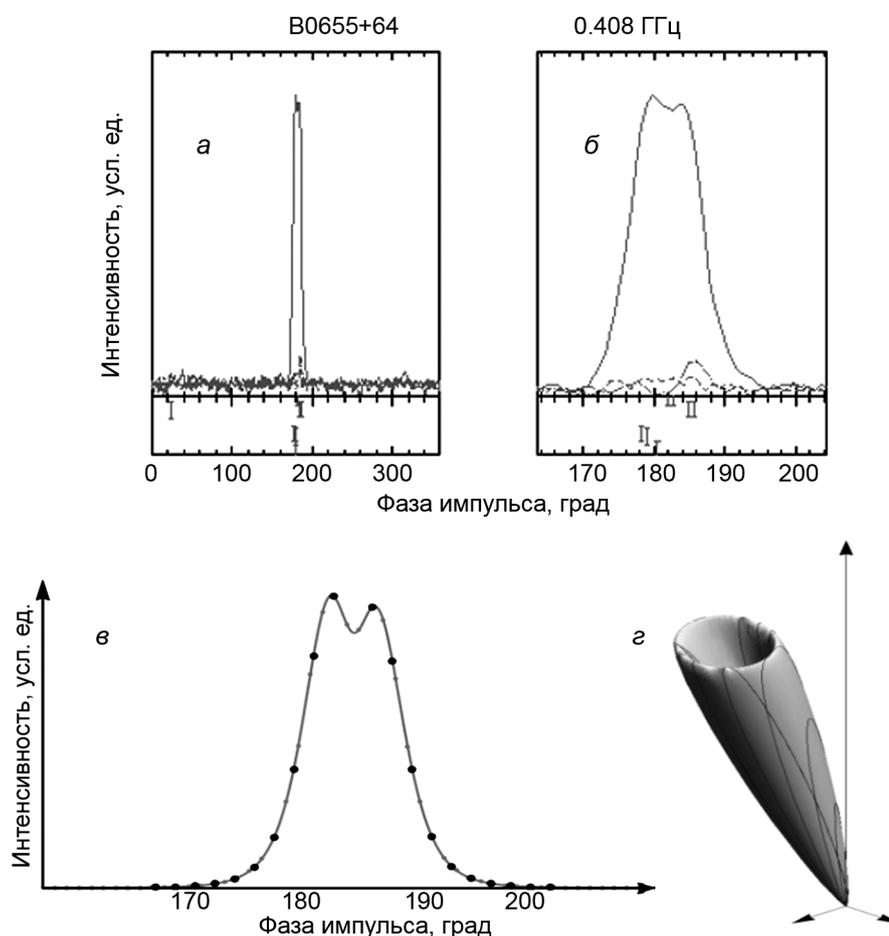


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для PRS 0655+64

Заключение

Разработанный в данной работе метод кинематического построения профилей излучения пульсаров для мгновенного излучения кривизны из магнитных полюсов на основе соответствующих индикатрис синхротронного излучения (модель Радхакришнана и Кука) дает хорошее соответствие экспериментально наблюдаемому излучению, приходящему от некоторых конкретных пульсаров. Достоинством метода является то, что в нем заложено множество параметров, влияющих на формирование профилей излучения пульсаров: сферические углы наблюдателя; угловая скорость и период вращения пульсара; угол наклона магнитной оси пульсара и угол наклона луча зрения по отношению к вектору угловой скорости; угол наклона индикатрисы излучения относительно магнитной оси пульсара и угол поворота плоскости симметрии самой индикатрисы; наконец, кинематические характеристики излучающих частиц, такие, как векторы скорости и ускорения. Все эти параметры позволяют с высокой степенью точности воспроизводить профили излучения экспериментально наблюдаемых пульсаров, что показано на примерах целого ряда конкретных пульсаров. Точность в определении кинематических параметров для наблюдаемых профилей была достигнута с помощью численного моделирования для параметров индикатрисы методом Гаусса – Ньютона. Таким образом, проделанная в данной работе идентификация параметров излучения пульсаров в дальнейшем может помочь глубже разобраться с феноменом периодичности излучения нейтронной звезды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. – М.: Наука, 1984. – 384 р.
2. Gold T. // Nature. – 1968. – V. 218. – P. 731.
3. Бордовицын В.А., Немченко Е.А. // Всерос. астрономич. конф. «Многоликая Вселенная» ВАК-2013. Тез. докл. – СПб., 2013. – С. 35–36.
4. Багров В.Г., Бордовицын В.А. Теория излучения релятивистских частиц / под ред. В.А. Бордовицына. – М.: Физматлит, 2002. – С. 13–80.
5. European Pulsar Network: Data Achieve Browsing Facility. – <http://www.jb.man.ac.uk/research/pulsar/Resources/epn/browser.html>. — 03.04.2016.
6. Ortega J. and Reinboldt W. Iterative Solution of Nonlinear Equations in Several Variables. – Philadelphia: Academic Press, 2000. – 572 p.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 25.07.16.

Авдюшев Виктор Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. астрономии и космической геодезии НИ ТГУ, e-mail: sch@niipmm.tsu.ru;

Бордовицын Владимир Александрович, д.ф.-м.н., профессор, профессор каф. теоретической физики НИ ТГУ, e-mail: vabord@sibmail.com;

Гроховская Александра Александровна, магистрантка каф. астрономии и космической геодезии НИ ТГУ.