

УДК: 524.354.4

## РАДИОСВЕТИМОСТИ ПУЛЬСАРОВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ГАЛАКТИКЕ

Р. Р. АНДРЕАСЯН, Т. Г. АРШАКЯН

Поступила 14 октября 1992

Принята к печати 21 ноября 1992

Радиосветимости пульсаров представлены зависимостью от периода и временного изменения периода. Вычислены параметры этой зависимости и определены неизменные расстояния для 288 пульсаров. По известным мерам дисперсии определены средние электронные плотности в направлении пульсаров.

Полученные результаты используются для изучения крупномасштабного распределения электронной концентрации в Галактике на расстоянии 4-5 кпк от Солнца. Максимум распределения находится на расстоянии 9 кпк от центра Галактики в области расположения спирального рукава Стрельца. В межрукавных областях (в направлениях спиральных рукавов Персея и Центавра) плотность электронов падает по экспоненциальному закону.

*1. Введение.* В настоящее время известны более 300 пульсаров. Для большей части этих объектов определены основные наблюдательные характеристики: средний поток излучения на разных частотах, период пульсаций, изменения периода, мера дисперсии, мера вращения, эквивалентная ширина импульсов и многие другие [1]. Собранный огромное количество разного рода данных пульсаров, дает широкую возможность для использования их в статистике. Пульсары заслуженно считаются зондами межзвездной среды, поскольку их расстояния, определенные по мерам дисперсии, считаются более или менее надежными (хотя, как будет показано ниже, они могут содержать большие регулярные ошибки). Это дает возможность найти распределение плотности электронов и отдельных облаков межзвездной среды, структуру магнитного поля и других характеристик в разных направлениях на разных расстояниях от центра и плоскости Галактики (см., например [2,3]).

В настоящей работе изучается возможность определения светимостей пульсаров, не зная заранее расстояния до них. Это дает

возможность определить расстояния пульсаров, не используя при этом меры дисперсии. Очевидно, что такие расстояния будут свободны от регулярных ошибок, которые свойственны расстояниям, найденным по мерам дисперсии (последнее связано с недостаточным знанием распределения электронной концентрации в Галактике).

Поскольку общеизвестно, что пульсары - это быстро вращающиеся нейтронные звезды, мы в дальнейшем одинаково будем использовать название пульсары и нейтронные звезды.

2. *Радиосветимости пульсаров.* Общеизвестно, что пульсары излучают за счет потери энергии вращения нейтронных звезд. Это приводит к замедлению вращения пульсара или увеличению периода пульсации. Период  $P$  и временное изменение периода  $\dot{P}$  являются одним из хорошо изученных наблюдательных параметров пульсаров. Очевидно, что болометрическая светимость пульсаров должна зависеть от полной вращательной энергии нейтронной звезды, определяемая по  $P$  и темпу замедления, зависящая от  $\dot{P}$  [4]. С другой стороны, если принять, что вращение нейтронной звезды замедляется вследствие магнитодипольного излучения, то для магнитного поля пульсара имеем  $B_p \sim (P \dot{P})^{-1/2}$ , а темп потери энергии  $\dot{W} \sim B_p^2$  [5]. Таким образом, можно определить, что болометрическая светимость зависит от  $P$  и  $\dot{P}$ , как

$$L = \gamma P^\alpha \dot{P}^\beta, \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  неизвестные пока параметры. Здесь мы принимаем, что радиосветимость пульсаров тоже удовлетворяет соотношению (1). Поскольку в каталогах пульсаров наиболее полные данные приводятся на частоте 400 МГц, мы будем использовать радиосветимость пульсара на той же частоте  $L_{400} = R^2 S_{400} W / P$  [5] ( $R$  - расстояние пульсара от Солнца,  $S_{400}$  - средний поток излучения,  $W$  - эквивалентная ширина импульса). Поэтому

$$R^2 S_{400} W / P = \gamma P^\alpha \dot{P}^\beta \quad (2)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  определяются по наблюдательным величинам  $R$ ,  $W$ ,  $P$ ,  $\dot{P}$  и  $S_{400}$ . Формула (2) удобна тем, что логарифмируя ее, получаем

линейное уравнение относительно  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\lg(\gamma)$ . Такое уравнение можно написать для каждого пульсара в отдельности в виде

$$\lg(R^2 S_{\text{эф}} W/P)_i = \lg(\gamma) + \alpha \lg(P)_i + \beta \lg(\dot{P})_i \quad (3)$$

где  $i = 1, \dots, N$ . Таким образом, получается система из  $N$  линейных уравнений ( $N$  - число использованных пульсаров) с тремя неизвестными  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\lg(\gamma)$ , которая решается методом наименьших квадратов.

Отметим, что в работах [6,7], для зависимости (1), были получены следующие значения параметров:  $\alpha = -1.04 \pm 0.15$ ,  $\beta = 0.35 \pm 0.06$  и  $\alpha = -0.86 \pm 0.2$ ,  $\beta = 0.38 \pm 0.08$ , соответственно.

В работе [8] показано, что

$$L \sim B/P^2 \text{ для } B/P^2 < 10^{13} \\ \text{и } L \text{ постоянно при } B/P^2 > 10^{13}.$$

В настоящей работе используются большее количество пульсаров, чем в [6-8], а полученные результаты используются в целях изучения распределения электронной концентрации в Галактике.

В работе используются каталоги пульсаров из [1,5]. В объединенном каталоге имеются данные о 288 пульсаров, для которых известны все пять пажных параметров. Используя эти данные, методом наименьших квадратов из системы линейных уравнений (3), были определены параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , их дисперсии и коэффициент множественной корреляции  $\rho$  между светимостями, вычисленными из соотношения (1), и по наблюдательным данным (левая часть формулы (2)). Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

P(c)	N	$\lg \gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\rho$
Все	288	8.26 (0.0008)	-1.42 (0.19)	0.33 (0.013)	0.43
<0.7	148	10.03 (0.0012)	-0.61 (0.41)	0.43 (0.037)	0.34
>0.7	140	6.86 (0.0010)	-2.11 (0.49)	0.23 (0.018)	0.34

Во многих работах (см., например, [9]) показано, что короткопериодические и долгопериодические пульсары показывают отличия в распределениях основных характеристик.

Граница раздела пульсаров по периоду получена разными авторами в пределах от 0.5 до 1 с. В работе [10] было показано, что по периоду пульсары разделяются на две группы  $P < 0.7с$  и  $P > 0.7с$ . Эти две группы отличаются по распределению угловых растворов конуса излучения пульсаров. Поскольку угловые растворы конуса излучаемые пульсаров входят в формулу, по которой определяются наблюдаемые радиосветимости, в настоящей работе пульсары также были разделены по периоду  $P = 0.7с$ . Расчеты для отдельных групп приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что значения  $\alpha$  и  $\beta$ , полученные по полной выборке пульсаров, согласуются с результатами работ [6,7]. Для отдельных же групп пульсаров эти параметры сильно отличаются друг от друга, а также от значений, полученных для полной выборки пульсаров. Это еще раз говорит в пользу того, что короткопериодические и долгопериодические пульсары отличаются друг от друга по многим характеристикам [9,10].

**3. Распределение электронной концентрации в Галактике.** Изучение крупномасштабного распределения свободных электронов в Галактике имеет очень важное теоретическое (например, в теории турбулентного динамо в Галактике) и практическое значение (определение расстояний пульсаров по мерам дисперсий). Известно, что свободные электроны в Галактике распределены сильно неравномерно. Это, в основном, связано с наличием в Галактике II и III областей. Однако, несмотря на эти неоднородности в распределении электронов в Галактике, вероятно, существуют более крупные структурные детали, изучению которых посвящается этот раздел.

Определение средней электронной концентрации в межзвездной среде основано на использовании мер дисперсии (DM) пульсаров, расстояния до которых определены независимым методом. Таких пульсаров известно два-три десятка [1]. Расстояния до этих пульсаров определены по их связи с остатками сверхновых, или же по наличию или отсутствию в непрерывном спектре пульсара линий поглощения межзвездных облаков, расстояния до которых известны. Используя данные о расстояниях и меры дисперсии пульсаров, была оценена средняя плотность электронов в окрестности Солнца, которая в плоскости Галактики составляет примерно  $0.03\text{см}^{-3}$ . Отметим, что в настоящее время независимые от (DM) расстояния известны для 73 пульсаров [11], но эти данные тоже не достаточны для более

детального изучения крупномасштабного распределения электронов в Галактике. Для распределения электронов в окрестности Солнца принята формула

$$n_e = n_0 e^{-z/h}, \quad (4)$$

где  $z$  - расстояние от плоскости Галактики,  $n_0 = 0.03 \text{ см}^{-3}$ , а эквивалентная полутолщина распределения электронов  $h = 1000$  пк.

Для нахождения более детального распределения электронной концентрации используются результаты предыдущего раздела. Зависимость (2) при известных значениях  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и наблюдательных величинах  $S_{400}$ ,  $W$ ,  $P$ ,  $\dot{P}$  дает возможность определить расстояние пульсаров независимым методом. Для 288 пульсаров этим методом определялись теоретические расстояния  $R_T$ :

Из соотношения

$$DM = \int n_e dr = \bar{n}_e R \quad (5)$$

для каждого пульсара, вместо  $R$ , подставляя величину  $R_T$ , находится среднее значение  $n_e$  в направлении пульсара.

На рис. 1а и б приведены распределения значений  $\bar{n}_e$  по галактической долготе  $L$ , полученные для двух выборок (из табл. 1): по всем периодам и, разделенных по  $P = 0.7$  с, соответственно. Для наглядности вместо значений  $\bar{n}_e$  на графиках использована безразмерная величина  $\bar{n}_e/0.03 \text{ см}^{-3}$  или обратная ему величина, взятая со знаком минус, при  $\bar{n}_e < 0.03 \text{ см}^{-3}$ . Хотя значения  $R_T$  для каждого отдельного пульсара, полученные по разным выборкам, сильно отличаются друг от друга и от найденных по (DM) [1,5] расстояний, рисунки 1а и б качественно не отличаются друг от друга. На обоих рисунках видно, что в направлении антицентра Галактики значения  $\bar{n}_e$  в основном, значительно ниже среднего значения  $0.03 \text{ см}^{-3}$ , а в направлении центра Галактики значения  $\bar{n}_e$  несмотря на большую дисперсию, выше  $0.03 \text{ см}^{-3}$ . Поскольку можно было ожидать такой результат, то полученные выше значения  $R_T$  и  $\bar{n}_e$  в статистическом смысле довольно достоверны и могут содержать информацию о распределении электронной концентрации в Галактике. Сказанное дает основание использовать значение  $\bar{n}_e$  для изучения зависимости плотности электронов от галактоцентрических расстояний  $R_c$  и от расстояний пульсаров  $z$  над галактической плоскостью.

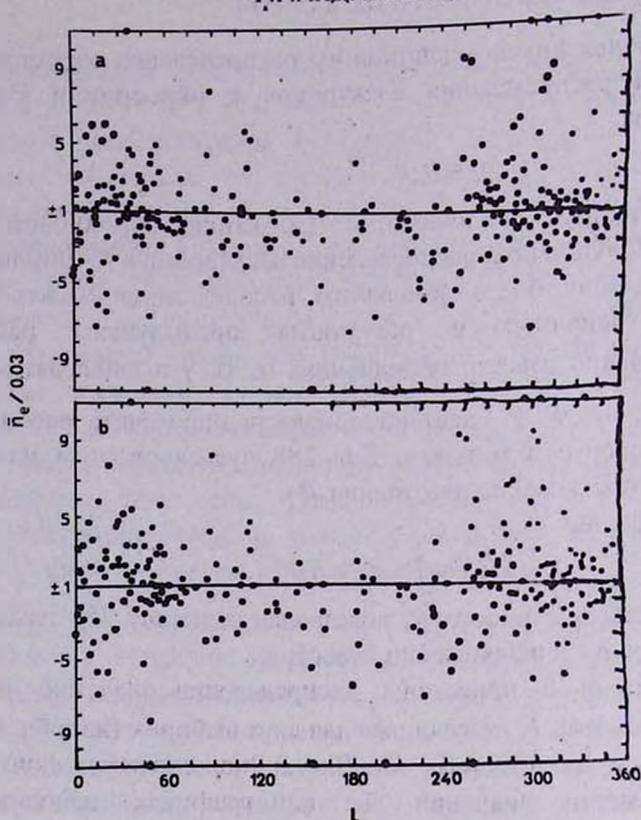


Рис. 1 Распределение средней электронной концентрации в направлении отдельных пульсаров по Галактической долготе. На оси ординат отложены значения  $\bar{n}_e / 0.03 \text{см}^{-3}$  при  $\bar{n}_e > 0.03 \text{см}^{-3}$  и  $-0.03 \text{см}^{-3} / \bar{n}_e$ , при  $\bar{n}_e < 0.03 \text{см}^{-3}$ , на оси абсцисс - галактическая долгота. Рис. 1а получен для всей выборки пульсаров. Рис. 1б - для той же выборки, разделенной по периоду ( $P = 0.7e$ ) на две подгруппы.

Нами были рассмотрены зависимости следующего вида

$$n_e(R_c, z) = n_1 + n_0 e^{-z/h} (10 \text{ кпк} / R_c)^\alpha \quad (6)$$

$$n_e(R_c, z) = n_1 + n_0 e^{-z/h} \exp((R_c - R_0)/\sigma)^\beta \quad (7)$$

Вместо  $n_e(R_c, z)$ , мы используем средние значения  $\bar{n}_e$  отдельных пульсаров. Расстояние от центра Галактики  $R_c$  определяется по расстояниям от Солнца и по галактическим координатам пульсаров. Расстояние Солнца от центра Галактики принимается равным 10 кпк. Параметры  $n_1$ ,  $n_0$ ,  $h$ ,  $\sigma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , и  $R_c$  находятся из численных расчетов. При расчетах по формуле (6)  $n_1$  переводится на левую сторону и после

логарифмирования получается линейное уравнение относительно  $n_0$ ,  $h$  и  $\alpha$ , которые определяются методом наименьших квадратов. Значение  $n_1$  находится методом проб. Выбирается то значение, при котором получается минимум дисперсии. Аналогичным образом из соотношения (7) определяются величины  $n_1$ ,  $n_0$ ,  $h$ ,  $R_0$ ,  $\sigma$ ,  $\beta$ , где  $n_1$ ,  $R_0$  и  $\beta$  подбираются методом проб.

Надо отметить, что формулы (6) и (7) качественно отличаются в основном тем, что в зависимости (6) нет максимума по  $R_c$ , а в (7), при значении  $R_c = R_0$  есть максимум. Зависимость от  $z$  в обеих формулах одинакова и совпадает с формулой (4). Вычисления по формуле (6) показали, что при выборке пульсаров  $R_c < 9$  кпк,  $\alpha$  - отрицательна ( $\alpha = -1.5$ ), а при  $R_c > 9$  кпк - положительна ( $\alpha = 3.5$ ). Это означает, что  $n_e(R_c, z)$  имеет максимум около  $R = 9$  кпк.

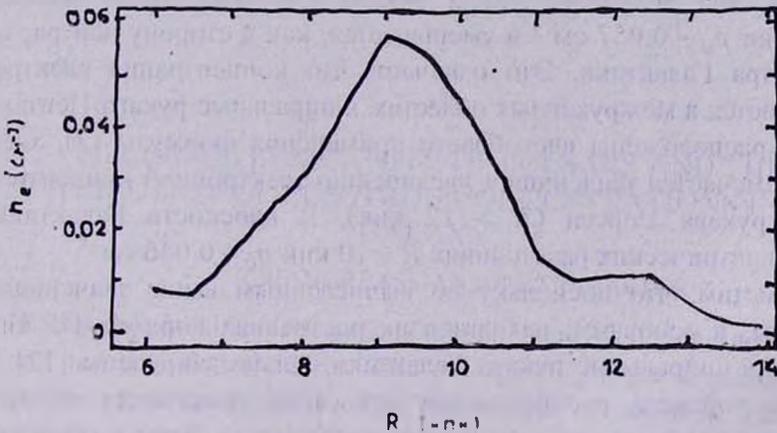


Рис. 2. Распределение электронной концентрации по галактоцентрическим расстояниям. Усреднение проводилось главным перемещением интервала величиной 1 кпк.

Такой же вывод можно получить из распределения  $\bar{n}_e$  по галактоцентрическим расстояниям  $R_c$  (рис. 2). При построении рисунка, мы исключили те пульсары, для которых  $R_T < 1$  кпк, поскольку на близких расстояниях от Солнца случайно расположенные III области могут внести большой вклад в (DM), значительно увеличивая среднюю электронную концентрацию в данном направлении. Из рисунка видно, что распределение  $n_e(R_c, z)$  можно аппроксимировать функцией (7) для  $\beta = 2$ . Параметры  $n_0$ ,  $h$  и  $\alpha$ , как

отмечалось выше, находится методом наименьших квадратов. Значения  $n_I$  и  $R_0$  находятся методом проб. Вычисления дают

$$\begin{aligned} n_0 &= 0.052 \text{ см}^{-3}, n_I = 0.005 \text{ см}^{-3}, h = 0.7 \text{ кпк} \\ R_0 &= 9 \text{ кпк}, \alpha = 2.88 \text{ кпк} \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, для функции  $n_e$  получаем симметричную функцию с максимумом на расстоянии 9 кпк, полушириной  $\alpha = 2.88$  кпк. Распределение по  $z$  имеет такой же вид и почти такую же эквивалентную полутолщину  $h$ , как в [1].

Надо отметить, что больше 90% пульсаров попадают в кольцо  $6 \text{ кпк} < R < 12 \text{ кпк}$ , поэтому распределение (7) с параметрами (8) можно использовать для этих расстояний. Максимум в распределении функции  $n_e$  совпадает с Галактическим рукавом Стрельца [12]. Таким образом, мы получили, что в рукаве Стрельца около плоскости Галактики  $n_e \sim 0.057 \text{ см}^{-3}$  и уменьшается, как в сторону центра, так и антицентра Галактики. Это означает, что концентрация электронов уменьшается в межрукавных областях. Спиральные рукава Центавра и Персея расположены вне области применения формулы (7), хотя на рис.2 намечается тенденция к увеличению электронной концентрации, вблизи рукава Персея ( $R > 12 \text{ кпк}$ ). В плоскости Галактики на галактоцентрических расстояниях  $R \sim 10 \text{ кпк}$   $n_e \sim 0.046 \text{ см}^{-3}$ .

Отметим, что поскольку по вычисленным выше значениям  $R_I$  пульсары, в основном, находятся на расстояниях порядка 4-5 кпк от Солнца, а спиральные рукава Галактики сильно закручены [12], то в пределах области распределения пульсаров расстояния от центра Галактики до спиральных рукавов меняются мало. Этим и объясняется полученное нами круговое распределение электронной концентрации. Более детальное исследование распределения электронной концентрации в Галактике затруднено в связи недостаточным количеством данных.

Были проведены вычисления также для отдельных выборок пульсаров с  $R < 9 \text{ кпк}$  и  $R > 9 \text{ кпк}$ , для выяснения симметричности распределения электронной концентрации относительно рукава Стрельца. Для этих двух выборок вычисления дали почти одинаковые значения  $\alpha$  и других параметров (довольно близких к параметрам (8)). В распределении по  $z$  видна слабая тенденция (в пределах ошибок) уменьшения эквивалентной полутолщины слоя электронов  $h$

направлении центра Галактики, что тоже соответствует принятой в настоящее время модели Галактики.

4. *Заключение.* В заключении отметим, что полученное в настоящей работе новое распределение электронной концентрации дает возможность по мерам дисперсии пульсаров заново определить расстояния пульсаров. Полученное таким образом распределение пульсаров в Галактике, вероятно, будет качественно отличаться от прежних (см. [1-3]), что в свою очередь изменит некоторые наши представления о распределении магнитных полей в Галактике. Изучению этих и других вопросов, связанных с новым распределением пульсаров в Галактике, будет посвящена отдельная работа.

Бюраканская астрофизическая  
обсерватория

## THE RADIO LUMINOSITY OF PULSARS AND THE DISTRIBUTION OF ELECTRON CONCENTRATIONS IN THE GALAXY

R.R.ANDREASSIAN, D.G.ARSHIKIAN

Radio luminosities of pulsars are presented depending on their periods and period derivatives. The parameters of that dependence and the independent distances for 288 pulsars are determined. The known dispersion measures are used for determination of the mean electron densities in the directions of pulsars.

The obtained results are used for investigation of the large-scale distribution of electron concentration in the Galaxy for solar distances of the order of 4-5 kpc. The maximum value of that distribution is found at a distance of 9 kpc from the galactic centre in the Sagittarius arm. In the inter arm regions (in the directions of Perseus and Scutum spiral arms) electron density decreases exponentially.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Р. Манчестер, Дж.Тейлор, Пульсары, "Мир", М., 1980.
2. J.G.Ables, R.N.Manchester, Astron. Astrophys., 50, 177, 1976.
3. Р.Р. Ліценсяни, А.П. Макаров, Астрофізика, 30, 170, 1989.
4. J.E. Gunn, J.P.Ostriker, Astrophys. J., 160, 979, 1970.
5. R.N. Manchester, J.H. Taylor, Astron. J., 86, 1953, 1981.
6. M. Proszynski, D. Przybycien, In Proceedings of the Workshop on "Millisecond Pulsars", held at N.R.A.O., Greenbank, W. Virg., June, 1984.
7. M. Vivekanand, R.J. Narayan, Astron. Astrophys., 2, 315, 1981.
8. G.M. Stollman, Astron. Astrophys., 171, 152, 1987.
9. И.Ф. Малюк, Труды ФИАН, 199, 83, 1989.
10. Т.Г. Аришкая, Астрофізика, 35, 227, 1991.
11. Dale A. Friel, Joel M. Weisberg, Astron. J., 100, 743, 1990.
12. Y.M. Georgelin, Y.P. Georgelin, Astron. Astrophys., 49, 57, 1976.