

УДК 524.354.4

## К ВОПРОСУ О ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ РАССЕЯНИЕМ И МЕРОЙ ДИСПЕРСИИ ПУЛЬСАРА В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

© 2019 г. Б. Я. Лосовский\*, Д. В. Думский<sup>1</sup>, Ю. А. Беляцкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушчино, Россия

Поступила в редакцию 05.02.2019 г.; после доработки 19.04.2019 г.; принята к публикации 29.04.2019 г.

Корреляция между рассеянием радиоволн и мерой дисперсии пульсара в Крабовидной туманности В0531+21, полученная сотрудниками ПРАО АКЦ ФИАН на БСА на частоте 111 МГц совместно с коллегами из Джодрелл Бэнк, подтверждается новыми независимыми измерениями в ПРАО и Джодрелл Бэнк. Вариации рассеяния изменяются в пределах 10–115 мс и объясняются затмением пульсара облаками плазмы туманности размером  $10^{11}$ – $10^{12}$  м с электронной плотностью  $n_e = 10^3$ – $10^4$  см<sup>-3</sup> и различной степенью турбулентности. В направлении пульсара в Крабовидной туманности в относительно спокойный период 2002–2007 гг. коэффициент турбулентности был равен  $C_n^2 = 0.00661$  м<sup>-7</sup>, средняя величина вариаций плотности в Крабовидной туманности  $\Delta n_e \sim 0.02$  см<sup>-3</sup>,  $n_e \sim 2$  см<sup>-3</sup> и относительная величина  $\Delta n_e/n_e \sim 0.01$ . В сравнительно активный период 2009–2013 гг.  $C_n^2 = 0.0662$  м<sup>-7</sup>,  $n_e \sim 2$  см<sup>-3</sup>,  $\Delta n_e \sim 0.06$  см<sup>-3</sup> и  $\Delta n_e/n_e \sim 0.03$ .

DOI: 10.1134/S0004629919090056

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Пульсар в Крабовидной туманности В0531+21 спорадически генерирует в радиодиапазоне так называемые гигантские импульсы (ГИ), плотность потока которых на порядки превышает среднюю плотность потока. Благодаря этим импульсам он и был открыт [1]. ГИ рассеиваются в межзвездной среде, причем величина рассеяния на низких частотах может значительно превышать период пульсара.

Явление вариаций рассеяния и меры дисперсии радиоимпульсов пульсара в Крабовидной туманности впервые зафиксировали Ренкин и Каунсельман [2] по наблюдениям в Аресибо в диапазоне 74–430 МГц в 1969–1971 гг. Анализируя вариации рассеяния, они пришли к выводу, что эти процессы происходят в основном в пределах Крабовидной туманности. Исаакмен и Ренкин [3] продолжили измерения до 1974 г. Они также зафиксировали вариации рассеяния и меры дисперсии, однако никакой значимой зависимости между этими явлениями не обнаружили.

Некоторые указания на зависимость между рассеянием и мерой дисперсии (по данным обсерватории Джодрелл Бэнк) пульсара в Крабовидной туманности за период с 1996 по 2006 г. были получены Бхатом и др. [4]. За основу были взяты

литературные данные с 1996 по 2006 г. вместе с собственными измерениями в 2006 г. на антенной решетке в Австралии на частотах 1300 и 1470 МГц.

Более убедительные данные о корреляционной зависимости между вариациями рассеяния и меры дисперсии были получены в ПРАО АКЦ ФИАН Кузьминым и Лосовским на частоте 111 МГц совместно с Джорданом и Смитом из обсерватории Джодрелл Бэнк во время увеличения рассеяния и меры дисперсии в течение 200 дней в 2006–2007 гг. [5]. Однако нельзя было исключить случайность этого совпадения. Необходимо было продолжить измерения, чтобы удостовериться, что корреляция действительно имеет место.

В настоящей статье приводятся новые данные, полученные в процессе наблюдения пульсара в Крабовидной туманности в 2002–2018 гг., которые, подтверждая вышеуказанную корреляцию, свидетельствуют, что вариации рассеяния зависят не только от меры дисперсии, но и степени неоднородности плазмы.

### 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Систематические наблюдения ГИ пульсара В0531+21 в Крабовидной туманности на частоте 111 МГц проводятся на Большой сканирующей антенне (БСА) ПРАО АКЦ ФИАН с сентября 2002 г. [6].

\*E-mail: blos@prao.ru

Радиотелескоп БСА ФИАН является меридианным инструментом с многолучевой диаграммой направленности, ширина одного луча которой по прямому восхождению и склонению составляет соответственно 44.0 и  $21.3/\cos Z$  угловых минут ( $Z$  — зенитное расстояние).

Антенна БСА (эффективная площадь  $20\,000 \pm \pm 2000 \text{ м}^2$ ) была модернизирована в 2012 г., и на ее основе сформирована новая антенна БСА2 (эффективная площадь  $47\,000 \pm 2500 \text{ м}^2$ ). В зависимости от температуры фона чувствительность приемной системы составляет от 7 до 18 мЯн в полосе 2.5 МГц и времени интегрирования 3 мин [7]. Длительность единичной записи космического источника радиоизлучения определяется временем его прохождения через диаграмму направленности антенны, составляющим для пульсара в Крабе 3.5 мин. На первом этапе наблюдения проводились с помощью 128-канального анализатора спектра АС-128 с шириной полосы каждого канала 20 кГц в общей полосе 2560 кГц с интервалом считывания 2.56 мс. Начиная с апреля 2006 г., наблюдения проводятся с использованием 512-канального цифрового анализатора спектра (ЦАС-512) с полосой каналов 5 кГц и интервалом считывания 2.56 мс.

ГИ анализируются с помощью специальной программы, позволяющей определить величину рассеяния путем моделирования прохождения импульса через рассеивающую среду [8]. Величины рассеяния, рассчитанные для каждого ГИ, усредняются по пяти дням наблюдения.

Значения усредненного параметра рассеяния сопоставляются с величинами меры дисперсии по данным обсерватории Джодрелл Бэнк [9]. Ежемесячные данные обсерватории интерполируются на расчетную дату.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

В течение 2002–2018 гг. были неоднократно зафиксированы нестационарные процессы, характеризующиеся повышенным рассеянием, в основном в 2009–2013 гг. (рис. 1).

Минимальное расчетное рассеяние на частоте 111 МГц наблюдалось в 2004 г. и составляло около 10 мс. Максимальное рассеяние зафиксировано в конце 2012–начале 2013 г. и достигало порядка 115 мс. Вариации рассеяния значительно превышают ошибки измерения (5%).

За время наших наблюдений в ПРАО, в обсерватории Джодрелл Бэнк было зарегистрировано 9 сбоев периода пульсара, причем сбой 8 ноября 2017 г. оказался самым большим за всю историю наблюдений пульсара в Крабовидной туманности [10].

За тот же период по литературным данным [11] наблюдалось 6 гамма-всплесков, причем шестой всплеск наблюдался в марте 2018 г. [12]. Определенной корреляции между сбоями периода, гамма-всплесками и вариациями рассеяния по нашим данным не наблюдается.

Чадеж и др. [13] проанализировали характеристики радиоизлучения пульсара Крабовидной туманности по данным обсерватории Джодрелл Бэнк за период с 1988 по 2014 г. вместе с данными оптических наблюдений. Они заключили, что сбой периода, вариации тайминга и меры дисперсии связаны с возмущениями в магнитосфере пульсара, которые могут приводить к выбросу заряженных частиц в туманность и к образованию волокон. Размеры волокон, затмевающих пульсар, составляют  $10^{11}–10^{12}$  м при электронной плотности  $10^3–10^4 \text{ см}^{-3}$  [11]. Возможно, однако, что не все сбой приводят к выбросам частиц, или некоторые новые волокна не пересекают луч зрения на пульсар, зато хорошо прослеживается связь между рассеянием и мерой дисперсии [14]. Коэффициент корреляции составляет  $0.85 \pm 0.01$  (рис. 2).

Измеренные Рудницким и соавт. [15] в рамках программы “Радиоастрон” вариации рассеяния от пульсара в Крабовидной туманности на частоте 1668 МГц в период с 2011 по 2015 г. качественно согласуются с измерениями на частоте 111 МГц.

Корреляция между рассеянием и мерой дисперсии пульсара в Крабовидной туманности подтверждается наблюдениями пульсара в период с 2009 по 2013 г. в обсерватории Джодрелл Бэнк на частоте 610 МГц на 42-футовом (12.8 м) радиотелескопе и на 1400 МГц на 76-метровом радиотелескопе [16].

Параметр рассеяния  $\tau_{sc}$  зависит от расстояния между источником и наблюдателем  $d$ , неоднородности среды  $\Delta n_e$  или от средней плотности электронов  $n_e$ , относительной неоднородности среды  $\Delta n_e/n_e$ , меры дисперсии  $DM = nd$  и частоты радиосигнала  $\nu$  [17]:

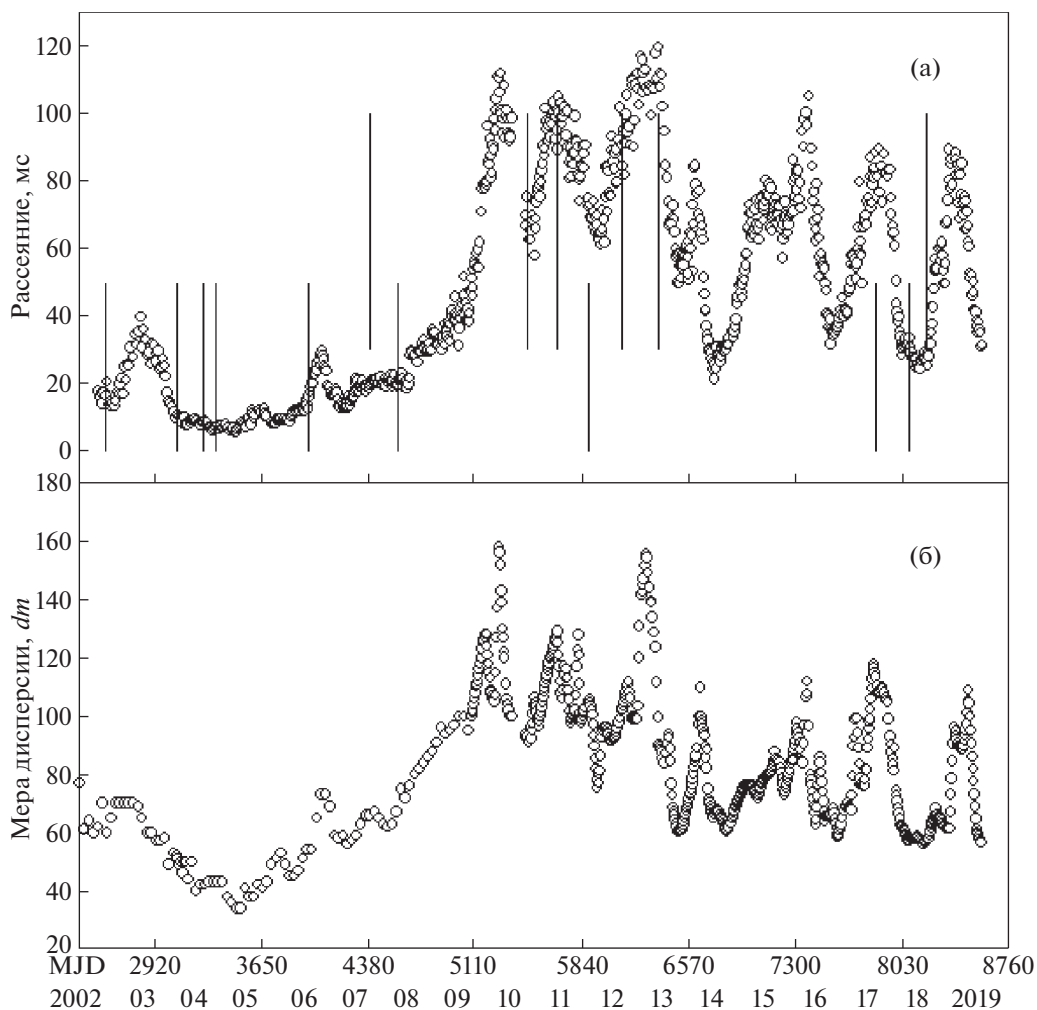
$$\tau_{sc} \approx (d\Delta n_e)^2/\nu^4 = [(\Delta n_e/n_e)DM]^2/\nu^4.$$

Из формулы следует, что рассеяние может быть разным при одинаковой мере дисперсии. В межзвездной среде, где параметр  $\Delta n_e/n_e$  практически постоянен, рассеяние при заданной частоте пропорционально квадрату меры дисперсии:

$$\tau_{sc} \approx CDM^2,$$

что и наблюдается для большинства пульсаров [18], а вариации рассеяния в первом приближении пропорциональны вариациям меры дисперсии:

$$\Delta\tau_{sc} \approx C_1\Delta DM.$$



**Рис. 1.** Изменение рассеяния (а) и условной меры дисперсии  $dm$  (б) пульсара в Крабовидной туманности на частоте 111 МГц в период 2002–2018 гг. На панели (а) вертикальными отрезками показаны моменты 9 сбоев периода (короткие отрезки) и 6 гамма-всплесков (длинные отрезки). По оси абсцисс — эпоха наблюдения в модифицированных юлианских днях  $MJD = JD - 2450000$  и соответствующих годах. По оси ординат — рассеяние (а), условная мера дисперсии (б)  $dm = 1000(DM - 56.7)$  пк/см<sup>3</sup>.

Однако, в пределах Крабовидной туманности параметр  $\Delta n_e/n_e$  подвержен значительным изменениям, поэтому вариации параметра  $\tau_{sc}$  зависят не только от меры дисперсии  $DM$ , но и от степени неоднородности плазмы ( $\Delta n_e/n_e$ ):

$$\Delta \tau_{sc} \approx C_1 \Delta DM + C_2 \Delta (\Delta n_e/n_e).$$

На неоднозначную зависимость между мерой дисперсии и рассеянием указал Манчестер в работе, посвященной многолучевому обзору плоскости Галактики с помощью 64-метрового радиотелескопа в Парксе на частоте 1374 МГц (Австралия) [19]. В результате указанного обзора были обнаружены пульсары с близкими периодами и мерами дисперсий, но различными величинами рассеяния. Автор объясняет это обстоятельство вариациями спектра турбулентности или флуктуациями электронной плотности в Галактике.

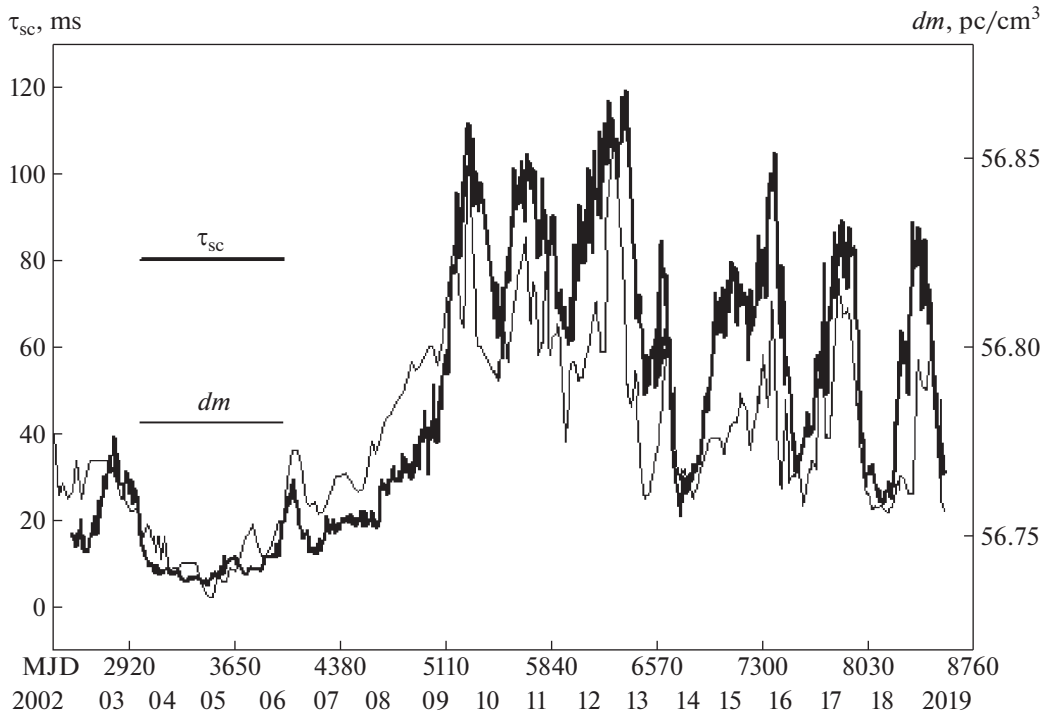
Квадратичный спектр флуктуаций электронной плотности (спектр турбулентности)  $\Phi(q)$ :

$$\Phi(q) = C_n^2 q^{-\alpha},$$

где  $C_n^2$  — коэффициент турбулентности,  $q$  — пространственная частота [20]. В качестве показателя степени  $\alpha$  принимают  $11/3$  (степенное колмогоровское распределение неоднородностей) или 4 (гауссовское распределение неоднородностей).

Измерения гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности в широком диапазоне частот от 40 до 2228 МГц показали, что частотная зависимость уширения импульсов рассеянием согласуется с моделью нормального распределения неоднородностей ( $\alpha = 4$ ) [21].

В 2002–2007 гг., в спокойный период,  $C_n^2 = 0.00661 \text{ м}^{-7}$ . Вариации меры дисперсии  $\Delta DM$



**Рис. 2.** Сопоставление вариаций рассеяния  $\tau_{sc}$  в мс (ось ординат слева) и условной меры дисперсии  $dm = 1000$  ( $DM - 56.7$ )  $\text{пк}/\text{см}^3$  (ось ординат справа). По оси абсцисс — эпоха наблюдения в модифицированных юлианских днях  $MJD = JD - 2450000$  и соответствующих им годах.

при базовом уровне меры дисперсии 56.745 [5] составили:

$$\Delta DM = (56.780 - 56.745) = 0.035,$$

что при радиусе туманности 1.7 пк соответствует среднему значению вариаций плотности Крабовидной туманности  $\Delta n_e \sim 0.02 \text{ см}^{-3}$ , и это согласуется с оценкой [16].

Если принять меру дисперсии Крабовидной туманности равной 4  $\text{пк}/\text{см}^{-3}$  [22], тогда  $n_e \sim 2 \text{ см}^{-3}$  и  $\Delta n_e/n_e \sim 0.01$ .

В 2009–2013 гг., в активный период,  $C_n^2 = 0.0662 \text{ м}^{-7}$ . Вариации меры дисперсии составили

$$\Delta DM = (56.850 - 56.745) = 0.105,$$

что соответствует среднему значению вариаций плотности  $\Delta n_e \sim 0.06 \text{ см}^{-3}$  и  $\Delta n_e/n_e \sim 0.03$ .

Заметим, что в межзвездной среде в направлении пульсара в Крабовидной туманности  $\Delta n_e \sim 2 \times 10^{-6} \text{ см}^{-3}$  [16]. При  $n_e = 0.03 \text{ см}^{-3}$  [17]  $\Delta n_e/n_e \sim 1.0 \times 10^{-4}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдаемые вариации величины рассеяния импульсов пульсара в Крабовидной туманности и меры дисперсии и их частичная корреляция

объясняются затмениями пульсара облаками плазмы размером  $10^{11} - 10^{12} \text{ м}$  с электронной плотностью  $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$  и различной степенью турбулентности. В 2002–2007 гг., в относительно спокойный период, коэффициент турбулентности в направлении пульсара составлял  $C_n^2 = 0.00661 \text{ м}^{-7}$  при средней величине плотности в Крабовидной туманности  $n_e \sim 2 \text{ см}^{-3}$ , средней величине вариаций плотности в Крабовидной туманности  $\Delta n_e \sim 0.02 \text{ см}^{-3}$  и относительной величине  $\Delta n_e/n_e \sim 0.01$ . В 2009–2013 гг., в достаточно активный период,  $C_n^2 = 0.0662 \text{ м}^{-7}$ ,  $n_e \sim 2 \text{ см}^{-3}$ ,  $\Delta n_e \sim 0.06 \text{ см}^{-3}$  и  $\Delta n_e/n_e \sim 0.03$ .

В межзвездной среде в направлении пульсара в Крабовидной туманности  $\Delta n_e \sim 2 \times 10^{-6} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_e = 0.03 \text{ см}^{-3}$  и  $\Delta n_e/n_e \sim 1.0 \times 10^{-4}$ .

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполняется по программе Президиума РАН “Космос: исследование фундаментальных процессов и их взаимосвязи”.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны анонимному рецензенту за полезные рекомендации и А.С. Лосовскому за помощь при подготовке статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. H. Staelin and E. C. Reifstein, *Science* **162**, 1481 (1968).
2. J. M. Rankin and C. C. Counselman, *Astrophys. J.* **181**, 875 (1973).
3. R. Isaakman and J. M. Rankin, *Astrophys. J.* **214**, 214 (1977).
4. N. D.R. Bhat, S. J. Tingau, and H. S. Knight, *Astrophys. J.* **676**, 1200 (2008).
5. A. Kuzmin, B. Ya. Losovsky, C. A. Jordan, and F. Graham Smith, *Astron. and Astrophys.* **483**, 13 (2008).
6. А. Д. Кузьмин, Ю. А. Беляцкий, Д. В. Думский, В. А. Извекова, К. А. Лапаев, С. В. Логвиненко, Б. Я. Лосовский, В. Д. Пугачев, *Астрон. журн.* **88**, 454 (2011).
7. С.А. Тюльбашев, В.С. Тюльбашев, В.В. Орешко, С.В. Логвиненко, *Астрон. журн.* **93**, 177 (2016).
8. S. K. Alurkar, O. B. Slee, and A. D. Borba, *Aust. J. Phys.* **39**, 433 (1986).
9. Jodrell Bank Crab Pulsar Monthly Ephemeris, <http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/crab/crab2.txt>.
10. B. Shaw, A. G. Lyne, B. W. Stappers, P. Weltevrede, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **478**, 3832 (2018).
11. Б. Я. Лосовский, *Астрон. журн.* **94**, 204 (2017).
12. J. Valverde, R. Ojha, and R. Buehl, *The Astronomer's Telegram* N11412 (2018).
13. A. Cadez, L. Zampieri, C. Barbieri, M. Calvani, G. Naletto, M. Barbieri, and D. Ponikvar, *Astron. and Astrophys.* **587**, A99 (2016).
14. Б. Я. Лосовский, Д. В. Думский, Ю. А. Беляцкий, *Астрон. циркуляр.* № 1644 (2018).
15. А. Г. Рудницкий, М. В. Попов, В. А. Согласнов, *Астрон. журн.* **94**, 387 (2017).
16. J. W. McKee, A. G. Lyne, B. W. Stappers, C. G. Bassa, and C. A. Jordan, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **479**, 4216 (2018).
17. Р. Манчестер, Дж. Тейлор *Пульсары* (М.: Мир, 1980).
18. А. Д. Кузьмин, Б. Я. Лосовский, *Астрон. журн.* **76**, 338 (1999).
19. R. N. Manchester, *Astrophys. Space Sci.* **278**, 33 (2001).
20. J. M. Cordes, J. M. Weisberg, and V. Boriakoff, *Astrophys. J.* **288**, 221 (1985).
21. А. Д. Кузьмин, В. И. Кондратьев, С. В. Костюк, Б. Я. Лосовский, М. В. Попов, В. А. Согласнов, Н. Д. Амико, С. Монтобуньоли, *Письма в Астрон. журн.* **28**, 292 (2002).
22. А. Д. Кузьмин, Б. Я. Лосовский, С. В. Логвиненко, И. И. Литвинов, *Астрон. журн.* **85**, 1011 (2008).