

Влияние мелкомасштабного поля на нагрев полярной шапки радиопульсара J0901-4046

© Д.П. Барсуков, И.К. Морозов, А.Н. Попов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: bars.astro@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 11 мая 2023 г.

В окончательной редакции 22 августа 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Рассмотрено влияние мелкомасштабного магнитного поля на нагрев полярной шапки пульсара J0901-4046 обратным током позитронов. Показано, что при некоторых конфигурациях мелкомасштабного поля светимость его полярной шапки может достигать 10^{25} erg/s.

Ключевые слова: радиопульсары, нейтронные звезды, позитроны.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56810.f226-23

Введение

Радиопульсар J0901-4046 — самый медленно вращающийся известный радиопульсар [1]. Его период вращения P составляет всего $P = 75.89$ s [1]. Оценка его магнитного поля по $\dot{P} = 2.25 \cdot 10^{-13}$ дает значение дипольного магнитного поля B_{dip} на магнитном полюсе $B_{dip} = 2.6 \cdot 10^{14}$ G [1], при этом его характеристический возраст $\tau = P/2\dot{P}$ равен $\tau = 5.3 \cdot 10^6$ year, потери вращательной энергии $\dot{E} = 2.0 \cdot 10^{28}$ erg/s [1]. Расстояние D до него составляет либо 328 pc, либо 467 pc [1]. Подобные пульсары лежат ниже „линии выключения“ и обычно объясняются присутствием мелкомасштабной компоненты магнитного поля на поверхности нейтронной звезды, см. например, [2–5]. В настоящей работе мы рассматриваем влияние мелкомасштабного поля на нагрев полярной шапки этого пульсара.

1. Модель

Магнитное поле вблизи магнитного полюса пульсара моделируется с использованием двух-дипольной модели [3]:

$$B(x) = \frac{3x(x \cdot m) - mr^2}{r^5} + \frac{3r_{sc}(r_{sc} \cdot m_{sc}) - m_{sc}r_{sc}^2}{r_{sc}^5}, \quad (1)$$

где $r = |x|$ — расстояние от центра звезды, плоскость $z = 0$ соответствует поверхности нейтронной звезды, z — высота над поверхностью звезды, $m = me_z$ — дипольный магнитный момент звезды, $B_{dip} = 2m/r_{ns}^3$, $r_{sc} = x + \delta r_{ns}e_x - (r_{ns} - \ell)e_z$, $B_{sc} = 2m_{sc}/\ell^3$ напряженность мелкомасштабного магнитного поля на магнитном полюсе звезды, рис. 1. В настоящей работе мы ограничились только случаем $\ell = r_{ns}/20$. Угол наклона радиопульсара χ рис. 1 считался равным $\chi = 30^\circ$. Пульсар рассматривался в модели полярной шапки со стационарным свободным истечением электронов с поверхности звезды. Генерация электрон-позитронных пар рассчитывалась

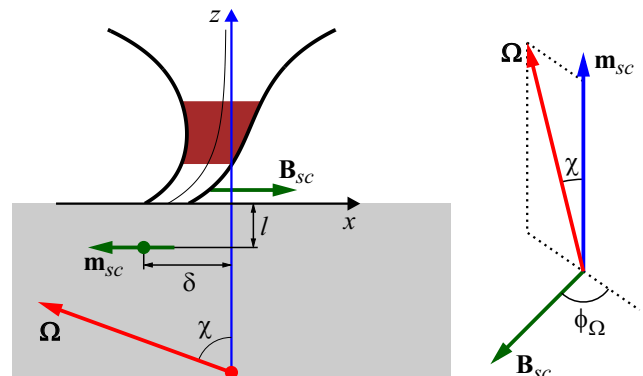


Рис. 1. Схематичное изображение пульсарной трубки. Направление угловой скорости Ω показано красной стрелкой (в онлайн версии), χ — угол наклона пульсара, коричневой областью (в онлайн версии) показано расположение пульсарного диода.

так же, как в работе [6]. При этом учитывалось, что пары рождаются в связанном состоянии (позитронии), которые потом ионизируются тепловым излучением с поверхности звезды. Параметр темпа фотоионизации W_0 считался равным $W_0 = 6 \cdot 10^5$ s $^{-1}$, см. [6,7]. Чтобы хоть как-то оценить возможное влияние расщепления фотонов и аннигиляции позитрониев, мы считали, что только доля f пар фотоионизируется, а остальные $(1 - f)$ пары аннигилируют сразу после образования. Температура поверхности звезды T_{surf} считалась равной $T_{surf} = 3 \cdot 10^5$ K.

2. Результаты

На рис. 2 показано влияние мелкомасштабного поля на светимость полярной шапки L_{tot} . Нагрев полярной шапки рассчитывался в рамках модели „быстрой экранировки“, см. детали расчета в [8]. На рис. 3 показано количество образовавшихся электрон-позитронных

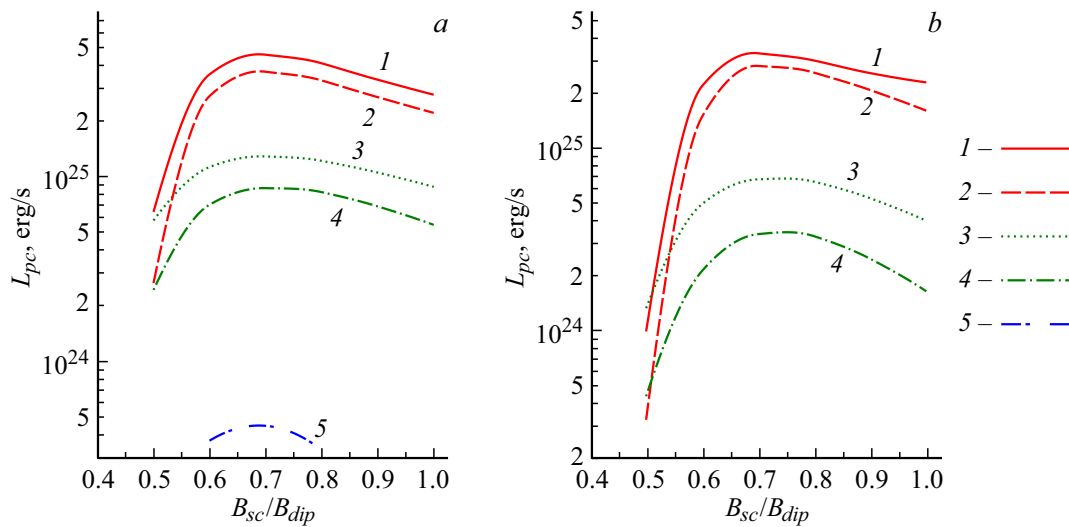


Рис. 2. Показана светимость L_{psc} полярной шапки из-за ее нагрева позитронами обратного тока для различных конфигураций мелкомасштабного поля. *a* — соответствует случаю $f = 1$, *b* — $f = 0.1$. 1 — $\delta = 0.03$, $\phi_\Omega = 0$, 2 — $\delta = 0.03$, $\phi_\Omega = 0.2\pi$, 3 — $\delta = 0.02$, $\phi_\Omega = 0$, 4 — $\delta = 0.02$, $\phi_\Omega = 0.2\pi$, 5 — $\delta = 0.01$, $\phi_\Omega = 0$.

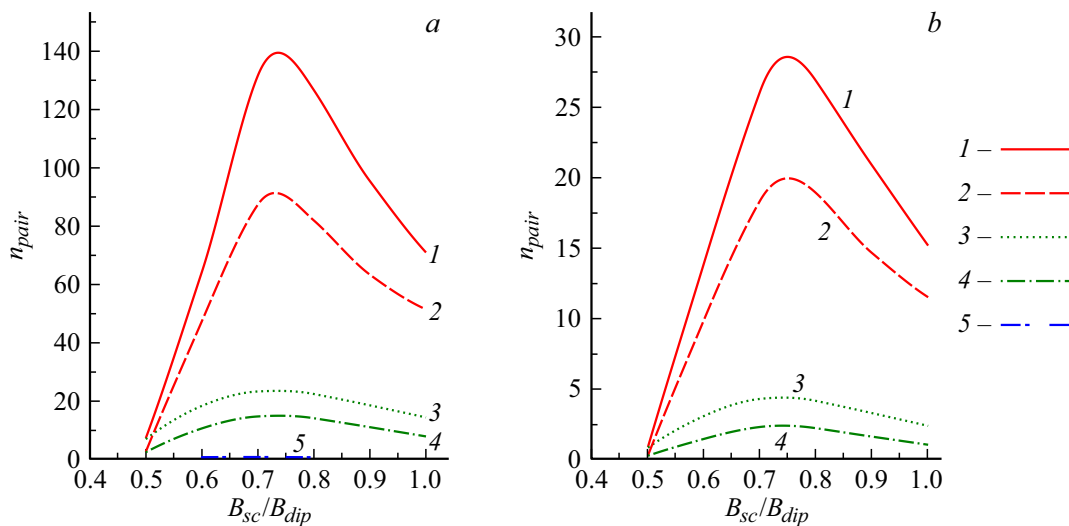


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для количества образующихся электрон-позитронных пар n_{pair} в единицах $(\Omega B_{dip})/(2\pi c e)$. 1 — $\delta = 0.03$, $\phi_\Omega = 0$, 2 — $\delta = 0.03$, $\phi_\Omega = 0.2\pi$, 3 — $\delta = 0.02$, $\phi_\Omega = 0$, 4 — $\delta = 0.02$, $\phi_\Omega = 0.2\pi$, 5 — $\delta = 0.01$, $\phi_\Omega = 0$.

пар n_{pair} в единицах $(\Omega B_{dip})/(2\pi c e)$, где $\Omega = 2\pi/P$ — угловая скорость вращения звезды. В случае $\phi_\Omega = 0$, $\delta = 0.01$ при $f = 1$ пульсар находится на грани выключения $n_{pair} \sim 0.2(\Omega B_{dip})/(2\pi c e)$, при $f = 0.1$ он уже выключен. В настоящей работе мы предположили, что нейтронная звезда имеет температуру поверхности $T_{surf} = 3 \cdot 10^5$ К и заметное мелкомасштабное поле с масштабом $\ell \sim 1$ km при том, что его возраст $\tau = 5.3 \cdot 10^6$ year. Стоит, во-первых, отметить, что более старый пульсар B0950+08 с возрастом $\tau = 17.5 \cdot 10^6$ year имеет температуру поверхности звезды $T_{surf} = (1 - 3) \cdot 10^5$ К [9]. Во-вторых, звезда могла быть дополнительно подогрета ротохимическим механизмом [10] либо, как, возможно, и J0250+5854, пульсар

J0901-4046 недавно прошел через стадию холлового аттрактора [11], во время которой, в частности, могло образоваться его мелкомасштабное поле. Кроме того, возможно, его реальный возраст не столь велик и составляет всего лишь $\sim 10^3 - 10^5$ year [12], так что звезда могла просто не успеть остыть, а мелкомасштабное поле заметно распасться. В настоящей работе мы предположили, что угол наклона пульсара равен $\chi = 30^\circ$, что не сильно отличается от используемого в работе [5] значения $\chi = 10^\circ$. Однако если в работе [5] предполагается, что дипольное магнитное поле на 2 порядка выше оценки [1], достигая на поверхности звезды значений $B_{dip} \sim 3 \cdot 10^{16}$ G, то в настоящей работе нам удалось показать, что для сохранения работы J0901-4046 можно

обойтись всего лишь удвоением поверхностного поля. При этом нужно отметить, что в нашем объяснении, в отличие от предложенного в работе [5], все же остаются проблемы, связанные с подавлением генерации электрон-позитронных пар из-за расщепления фотонов в сильном магнитном поле.

Благодарности

Авторы благодарят А.И. Цыгана, А.И. Чугунова и Д.Н. Собьянина за поддержку, комментарии и полезные обсуждения. Авторы благодарят И.Ф. Малова, В.М. Конторовича, Д.А. Румянцеву, В.А. Урпина и С.В. Бобашеву за полезные замечания и советы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Caleb, I. Heywood, K. Rajwade, M. Malenta, B.W. Stappers et al. *Nature Astronomy*, **6**, 828 (2022). DOI: 10.1038/s41550-022-01688-x
- [2] J.A. Hirschman, J. Arons. *ApJ*, **554** (1), 624 (2001). DOI: 10.1086/321378
- [3] Е.М. Кантор, А.И. Цыган, *Астроном. журн.*, **80** (7), 665 (2003). [E.M. Kantor, A.I. Tsygan, *Astronomy Reports*, **47** (7), 613 (2003). DOI: 10.1134/1.1592840]
- [4] E.M. Novoselov, V.S. Beskin, A.K. Galishnikova, M.M. Rashkovetskiy, A.V. Biryukov. *MNRAS*, **494** (3), 3899 (2020). DOI: 10.1093/mnras/staa904
- [5] D.N. Sob'yanin, *Phys. Rev. D*, **107** (8), id. L081301 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevD.107.L081301
- [6] D.P. Barsukov, A.A. Matevosyan, I.K. Morozov, A.N. Popov, M.V. Vorontsov, *J. Phys.: Conf. Series*, **2103** (1), id. 012034 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012034
- [7] V.V. Usov, D.B. Melrose. *Austral. J. Phys.*, **48**, 571 (1995). DOI: 10.1071/PH950571
- [8] Д.П. Барсуков, О.А. Гогличидзе, А.И. Цыган. *Астроном. журн.*, **93** (6), 569 (2016). [D.P. Barsukov, O.A. Goglichidze, A.I. Tsygan. *Astronomy Reports*, **60** (6), 586 (2016). DOI: 10.1134/S106377291604003X]
- [9] G.G. Pavlov, B. Rangelov, O. Kargaltsev, A. Reisenegger, S. Guillot, C. Reyes. *ApJ*, **850** (1), id. 79 (2017). DOI: 10.3847/1538-4357/aa947c
- [10] S. Guillot, G.G. Pavlov, C. Reyes, A. Reisenegger, L.E. Rodriguez, B. Rangelov, O. Kargaltsev. *ApJ*, **874** (2), id. 175 (2019). DOI: 10.3847/1538-4357/ab0f38
- [11] A.P. Igoshev, S.B. Popov. *Research Notes American Astronom. Society*, **2** (3), id. 171 (2018). DOI: 10.3847/2515-5172/aac207
- [12] M. Ronchi, N. Rea, V. Graber, N. Hurley-Walker, *ApJ*, **934** (2), id. 184 (2022). DOI: 10.3847/1538-4357/ac7ccc