

# Влияние мелкомасштабного поля на нагрев полярной шапки радиопульсара J0250+5854

Барсуков Д.П.<sup>1,2</sup>, Воронцов М.В.<sup>2</sup>, Матвеев А.А.<sup>2</sup>, Морозов И.К.<sup>1</sup>, Попов А.Н.<sup>1</sup>

1 - ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2 - СПбГУ

Пульсар J0250+5854 имеет период вращения  $P = 23.5$  сек и является наиболее медленно вращающимся среди одиночных радиопульсаров. Мы рассматриваем влияние величины мелкомасштабного магнитного поля в модели смещенного диполя на обратный ток позитронов во внутреннем зазоре и связанный с ним нагрев полярной шапки пульсара. Пульсар рассматривается в модели "внутреннего зазора" со свободным истечением частиц с поверхности нейтронной звезды. Учитывается только рождение электрон-позитронных пар при поглощении квантов изгибного излучения в магнитном поле. При этом предполагается, что часть пар может рождаться в связанном состоянии – в виде позитрониев, которые затем фотоионизируются тепловыми фотонами с поверхности звезды.

## J0250+5854

$$\begin{aligned} B_{dip} &= 5.12 \cdot 10^{13} \text{ Гс} \\ P &= 23.5 \text{ с} \\ \dot{P} &= 2.7 \cdot 10^{-14} \\ \tau &= 1.37 \cdot 10^7 \text{ лет} \\ \dot{E} &= 8.2 \cdot 10^{28} \text{ эрг/с} \\ D_{DM} &= 1.56 \text{ кпк [3]} \end{aligned}$$

предположим, что

- $\ell = 0.05 r_{ns}$
- только изгибное излучение первичных электронов
- фотоионизация позитрониев только фотонами с поверхности звезды

## Угол наклона $\chi$

$$w_{10} \approx 2.9^\circ \pm 0.4^\circ$$

наблюдаемая ширина импульса на уровне 10% на 350 МГц [1]

$$\rho_{10} = 2.3^\circ P^{-0.36} \approx 0.7^\circ$$

угловой радиус конуса излучения на 400 МГц [4]

угол наклона  $\chi$  можно оценить как [5]

$$\chi \lesssim \beta_1 = \arcsin \left( \frac{\sin(\frac{\rho_{10}}{2})}{\sin(\frac{w_{10}}{4})} \right) \approx 31^\circ$$

Согласно [6] J0250+5854 близок к соосному  $\chi \sim 3^\circ$  и

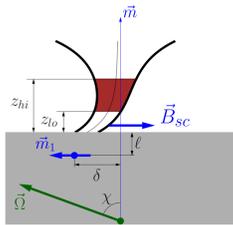
"наибольшее возможное" значение угла наклона  $\chi \approx 36^\circ$  [6].

**J0250+5854 близок к соосному  $\chi \approx 0^\circ$**

**Возражения:**

- J0250+5854 близок к ортогональному  $\chi \approx 90^\circ$  [2]
- $\chi \lesssim 48^\circ$  в случае если принять оценку  $\rho_{10} = 2.87^\circ P^{-0.27}$  [5]
- При использовании оценки  $\rho_{10} = 9.3^\circ P^{-0.36} \approx 3^\circ$  на 400 МГц [7] и  $\rho_{10} \sim 3^\circ$  [1] угол наклона  $\chi$  может быть любым.

## Мелкомасштабное поле



$$\vec{B}(\vec{x}) = \frac{3\vec{x}(\vec{x} \cdot \vec{m}) - \vec{m}r^2}{r^5} + \frac{3\vec{\rho}_{sc}(\vec{\rho}_{sc} \cdot \vec{m}_{sc}) - \vec{m}_{sc}\rho_{sc}^2}{\rho_{sc}^5}$$

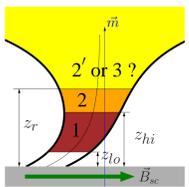
$$\rho_{sc} = \vec{x} + \delta \vec{e}_x - (r_{ns} - \ell) \vec{e}_z$$

$$\vec{m} = m \vec{e}_z, \quad B_{dip} = 2m/r_{ns}^3$$

$$\vec{m}_{sc} = -m_{sc} \vec{e}_x, \quad B_{sc} = 2m_{sc}/\ell^3$$

$$\ell = \frac{1}{20} r_{ns} \sim 500 \text{ м}$$

## Нагрев полярной шапки пульсара



- быстрая экранирка [16]  
область 2:  $z_{hi} < z < z_r$ ,  $E_{||} \neq 0$ , дает вклад в обратный ток  
область 3:  $z > z_r$ ,  $E_{||} = 0$ , не дает вклада в обратный ток
- медленная экранирка [17]  
всюду при  $z > z_{hi}$ ,  $E_{||} \neq 0$  и все высоты дают вклад в обратный ток

$$L_{pe} = \int eV \frac{\partial B}{2\pi c \ell} \Big|_{z=0} \rho_{sc} dS$$

$V$  – разность потенциалов в зоне ускорения  
 $\rho_{sc}$  – концентрация позитронов обратного тока в единицах  $\frac{Q_0}{2\pi c}$

## Фотоионизация позитрониев

Доля пар  $P_3$  рождающихся в связанном состоянии аппроксимировалась как

- $P_3 = 0$  при  $B < B_{low}$  (позитрони не рождаются)
- $P_3 = (B - B_{low}) / (B_{high} - B_{low})$  при  $B_{low} \leq B \leq B_{high}$
- $P_3 = 1$  при  $B > B_{high}$  (все пары рождаются связанными)

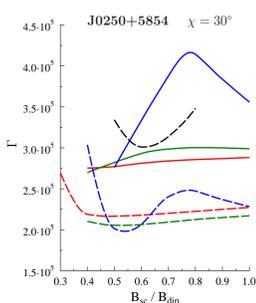
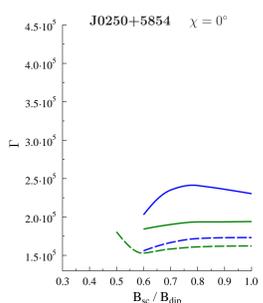
где  $B_{low} = 0.04 B_p$  и  $B_{high} = 0.15 B_p$  [8]

Темп фотоионизации пар считался равным [8]

$$\frac{dN}{dt} = W_0 \left( \frac{10^5}{\Gamma} \right)^3 \left( \frac{T}{10^6 \text{ К}} \right)^2 (1 - \cos \theta_{cap})$$

где  $\Gamma$  – лоренц-фактор позитрония,  $T$  – температура поверхности звезды,  $\theta_{cap}$  – угол, под которым видна нейтронная звезда

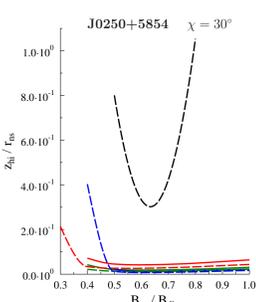
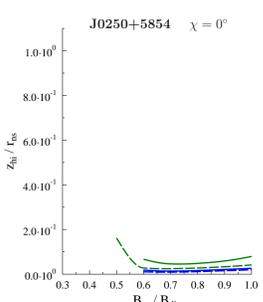
$$W_0 \approx 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1} \quad [8]$$



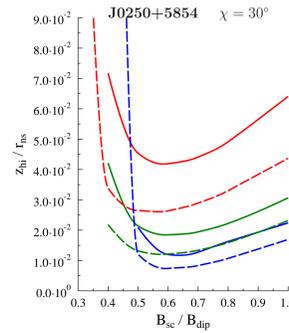
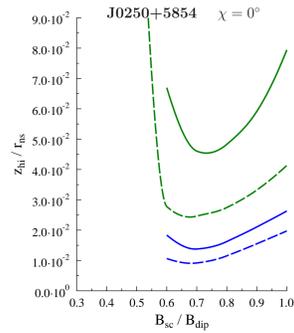
$T = 3 \cdot 10^5 \text{ К}$   
 $\delta = 0.03 r_{ns}$   
 $\delta = 0.02 r_{ns}$   
 $\delta = 0.01 r_{ns}$   
 $\delta = 0$

$T = 10^5 \text{ К}$   
 $\delta = 0.03 r_{ns}$   
 $\delta = 0.02 r_{ns}$   
 $\delta = 0.01 r_{ns}$

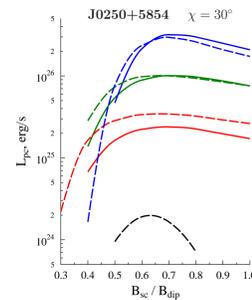
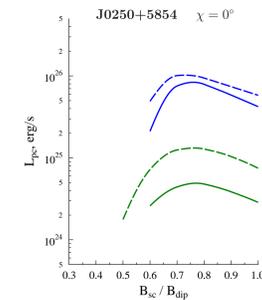
На левом рисунке показан лоренц фактор  $\Gamma = \frac{dN}{dt}$  первичных электронов для случая соосного пульсара  $\chi = 0^\circ$ , на правом – для случая  $\chi = 30^\circ$ . Сплошные линии соответствуют случаю когда температура  $T$  поверхности звезды равна  $T = 10^5 \text{ К}$ , штриховые – случаю  $T = 3 \cdot 10^5 \text{ К}$ . Сини линии соответствуют случаю  $\delta = 0.03 r_{ns}$ , зеленые –  $\delta = 0.02 r_{ns}$ , красные –  $\delta = 0.01 r_{ns}$ , черная линия соответствует случаю  $\delta = 0$ .



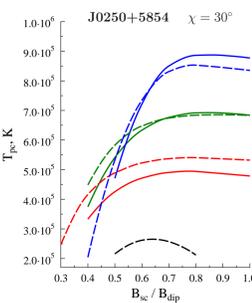
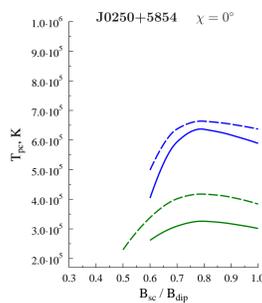
На левом рисунке показана высота верхней оболочки  $z_{hi}$  для случая соосного пульсара  $\chi = 0^\circ$ , на правом – для случая  $\chi = 30^\circ$ .



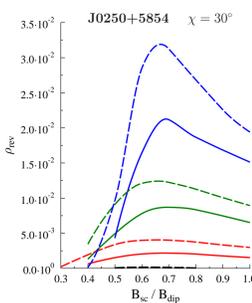
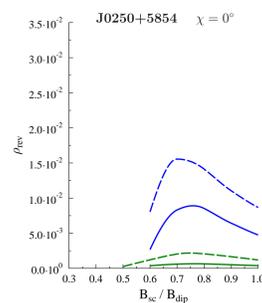
То же самое, что на предыдущем рисунке, только в другом масштабе.



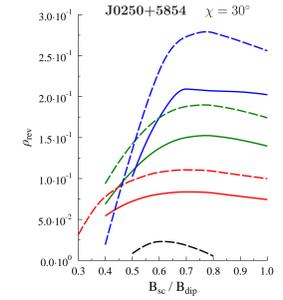
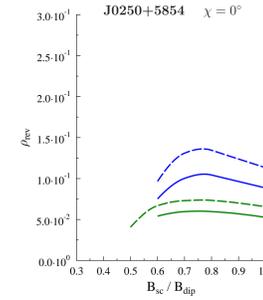
На левом рисунке показана светимость полярной шапки  $L_{pe}$  в модели быстрой экранирки для случая соосного пульсара  $\chi = 0^\circ$ , на правом – для случая  $\chi = 30^\circ$ .



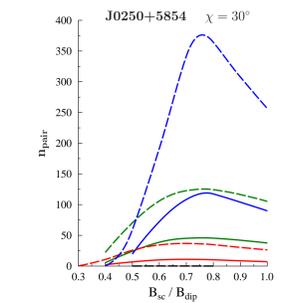
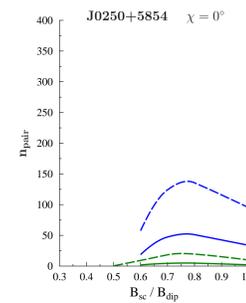
На левом рисунке показана температура полярной шапки  $T_{pe}$  в модели быстрой экранирки для случая соосного пульсара  $\chi = 0^\circ$ , на правом – для случая  $\chi = 30^\circ$ .



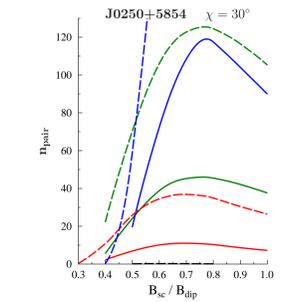
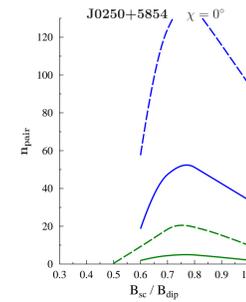
На левом рисунке показан обратный ток позитронов  $\rho_{rev}$  в единицах  $\frac{Q_0}{2\pi c}$  в модели быстрой экранирки для случая соосного пульсара  $\chi = 0^\circ$ , на правом – для случая  $\chi = 30^\circ$ .



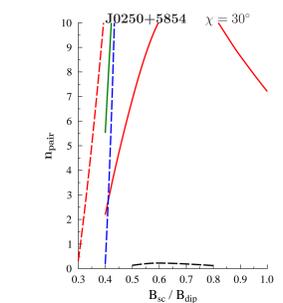
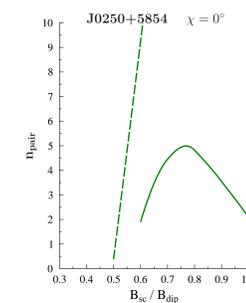
На левом рисунке показан обратный ток позитронов  $\rho_{rev}$  в единицах  $\frac{Q_0}{2\pi c}$  в модели медленной экранирки для случая соосного пульсара  $\chi = 0^\circ$ , на правом – для случая  $\chi = 30^\circ$ .



На левом рисунке показано количество электрон-позитронных пар, рождающихся независимыми, или фотоионизованными, приходящихся на 1 первичный электрон для случая соосного пульсара  $\chi = 0^\circ$ , на правом – для случая  $\chi = 30^\circ$ .



То же самое, что на предыдущем рисунке, только в другом масштабе.



То же самое, что на предыдущем рисунке, только в другом масштабе.

## Проблемы

- Мелкомасштабное поле с  $\ell \sim 500$  м при возрасте  $\tau = 13.7 \cdot 10^6$  лет. Почему до сих пор не распалося?
- Температура поверхности звезды  $T_{surf} \approx 10^5 \text{ К}$  при  $\tau = 13.7 \cdot 10^6$  лет. Почему до сих пор не остыла?  
(B0950+08 имеет  $T \sim (1-3) \cdot 10^5 \text{ К}$  при  $\tau = 17.5 \cdot 10^6$  years [13])
- Нагрев за счет ротохимических реакций и трения вихрей [14]?
- Холловский аттрактор [15]?
- Расщепление фотонов.
- Нестационарные колебания, искры.
- Корректный учет фотоионизации позитрониев.
- Корректный учет аннигиляции позитрониев.

Авторы благодарят А.И. Цыгана, О.А. Гогличидзе, К.Ю. Краава, В.М. Конторовича, Д.А. Румянцеву, Д.Н. Собьянина, И.Ф. Малова, В.А. Урфина и В.С. Бескина за полезную дискуссию и ценные замечания.

## Литература

- Tan C M and et al // *ApJ* V.866 54 (2018)
- Novoselov E M, Beskin V S, Galshnikova A K, Rashkoveckiy M M and Biryukov A V // *MNRAS* V.494, p.3899 (2020)
- R.N. Manchester et al // *Astron. J.*, V. 129, p. 1993 (2005)  
<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat>
- И.Ф. Малов, О.И. Малов, С.Л. Соснов // *Астрон. Журн.*, т.70, с.47 (1993)
- И.Ф. Малов, Е.Б. Ипаткина // *Письма в Астрон. Журн.*, т.88, с.22 (2011)
- Kou F F, Tong H, Xu R X and Zhou X // *ApJ* V.876 131 (2019)
- Malov I F // *Astrophysics*, 24, p. 289 (1986)
- V.V.Usov, D.B. Melrose // *Australian Journal of Physics*, V.48, p. 571 (1995)
- H. Herold, H. Ruder, G. Wunner // *Phys. Rev. Letters*, V. 54, p. 1452 (1985)
- J. Gil, G. Melikidze, B. Zhang // *Astrophysics and Space Science*, V. 308, p. 325 (2007)
- M.G. Baring, A.K. Harding // *ApJ* V. 547, p. 929 (2001)
- M.G. Baring // "Photon Splitting and Pair Conversion in Strong Magnetic Fields" Computing Anticipatory Systems: CASYS'07-English International Conference. AIP Conference Proceedings, V. 1051, p. 53 (2008)
- Pavlov G G, Rangelov B, Kargaltsev O, Reisnerger A, Guillot S and Reyes C // *ApJ* V.850 79 (2019)
- S. Guillot et al // *ApJ*, V.874, p.175 (2019)
- A.P. Igoshev, S.B. Popov // *Research Notes of the American Astronomical Society*, V.2, id 171 (2018)
- Arons J., Fawley W.M., Scharlemann E.T. // *ApJ*, V.231, p.854 (1979)
- Harding A.K., Muslimov A.G. // *ApJ*, V.556 p.987 (2001)
- Yu.E. Lyubarskii // *A&A* V.261 p.544 (1992)
- V.D.Пальшин, А.И.Цыган "Рентгеновое излучение полярных областей радиопульсаров. Недолжное поле."Препринт Физ.-тех. ин-та им. А.Ф.Иоффе N 1718 (С.-Петербург, 1998)
- A.Szary // *arXiv:1304.4203*
- E.M.Каптур, А.И.Цыган // *Астрон. журн.*, т.80, с.665 (2003)
- Д.П. Барсуков, О.А. Гогличидзе, А.И. Цыган // *Астрон. журн.*, т.93, с.569 (2016)

На левом рисунке показана температура полярной шапки  $T_{pe}$  в модели медленной экранирки для случая соосного пульсара  $\chi = 0^\circ$ , на правом – для случая  $\chi = 30^\circ$ .