

Влияние мелкомасштабного магнитного поля на нагрев полярных шапок старых радиопульсаров

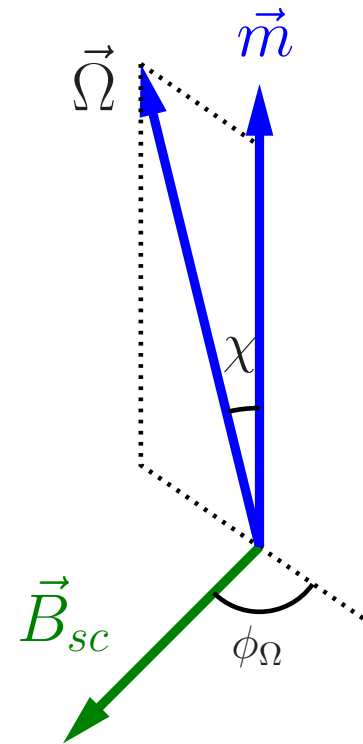
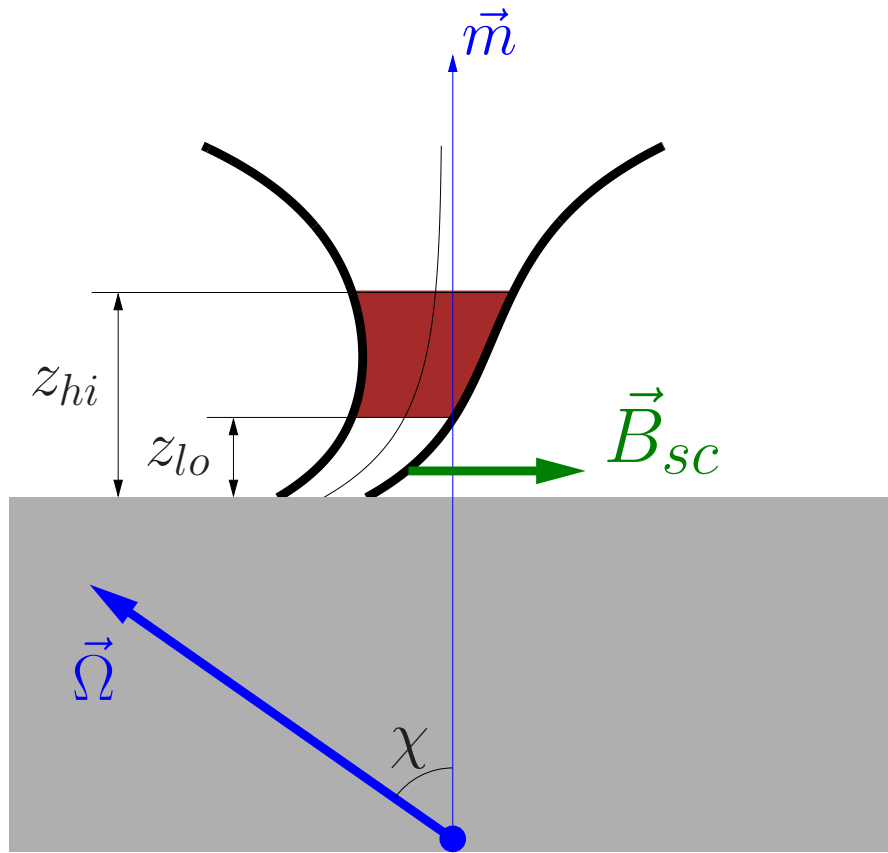
Барсуков Д.П.^{1,2}, Воронцов М.В.², Морозов И.К.^{1,2}

1 - ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2 - СПбПУ

Аннотация

Рассматривается влияние величины и направления мелкомасштабного магнитного поля на обратный ток позитронов во внутренних зазорах старых радиопульсаров и связанный с ним нагрев полярной шапки. 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 полярной шапки.

Мелкомасштабное поле

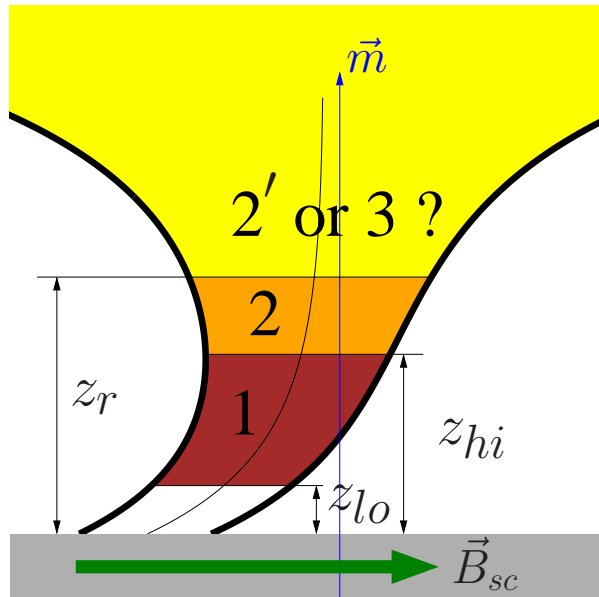


$$\vec{B} = \frac{3\vec{r}(\vec{r} \cdot \vec{m}) - \vec{m}r^2}{r^5} + \frac{3\vec{\rho}(\vec{\rho} \cdot \vec{m}_1) - \vec{m}_1\rho^2}{\rho^5}$$

$$\vec{\rho} = \vec{r} - (r_{ns} - \ell)\vec{e}_z, \quad \vec{m} = m\vec{e}_z, \quad \vec{m}_1 = \nu \left(\frac{\ell}{r_{ns}}\right)^3 m\vec{e}_x$$

$$\Delta = \frac{\ell}{r_{ns}} \quad \nu = \frac{B_{sc}}{B_{dip}} \lesssim 1 \quad 0 \leq \phi_\Omega \leq \frac{\pi}{2}$$

Нагрев полярной шапки пульсара



$$L_{pc} = \int eV \frac{\Omega B}{2\pi c e} \Big|_{z=0} \rho_+ dS$$

V – разность потенциалов в зоне ускорения

ρ_+ – концентрация позитронов обратного тока в единицах $\frac{\Omega B}{2\pi e}$

1. быстрая экранировка [9]

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

2. медленная экранировка [10]

всюду при $z > z_{hi}$ $E_{||} \neq 0$ и все высоты дают вклад в обратный ток

Фотоионизация позитрониев

Доля пар P_b рождающихся в связанном состоянии аппроксимировалась как

1. $P_b = 0$ при $B < B_{low}$ (позитронии не рождаются)
2. $P_b = (B - B_{low}) / (B_{high} - B_{low})$ при $B_{low} \leq B \leq B_{high}$
3. $P_b = 1$ при $B > B_{high}$ (все пары рождаются связанными)

где $B_{low} = 0.04 B_{cr}$ и $B_{high} = 0.15 B_{cr}$ [1]

Темп фотоионизации пар считался равным [1]

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

где Γ – лоренц-фактор позитрония, T – температура полярной шапки, θ_{cap} – угол, под которым видна полярная шапка

$$W_0 \approx 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1} [1] \quad \text{или} \quad W_0 \sim 10^8 \text{сек}^{-1} [2] ?$$

Предположим что $(1 - f)$ позитрониев мгновенно распадается сразу после своего образования, а f позитрониев не распадается вообще

J0250+5854

$$B_{dip} = 5.12 \cdot 10^{13} \text{ Гс}$$

$$P = 23.5 \text{ с}$$

$$\dot{P} = 2.7 \cdot 10^{-14}$$

$$\tau = 1.37 \cdot 10^7 \text{ лет}$$

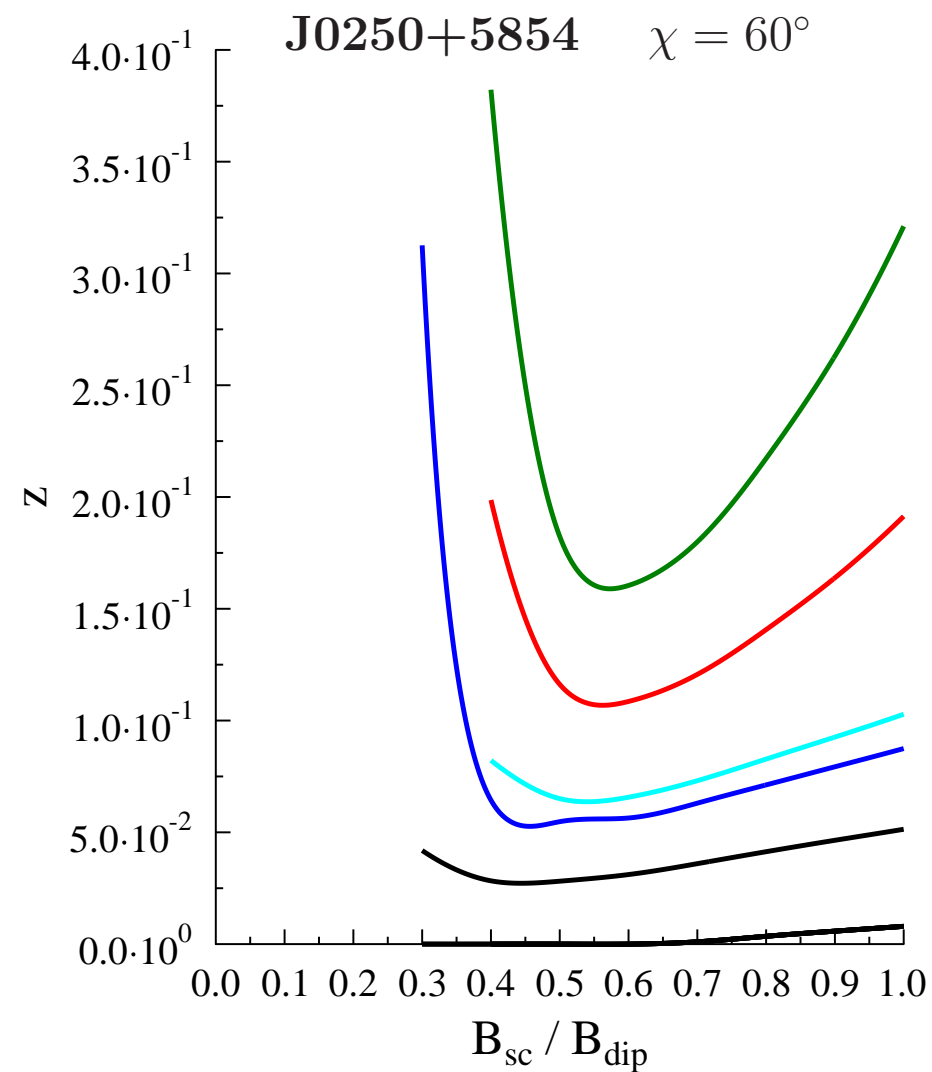
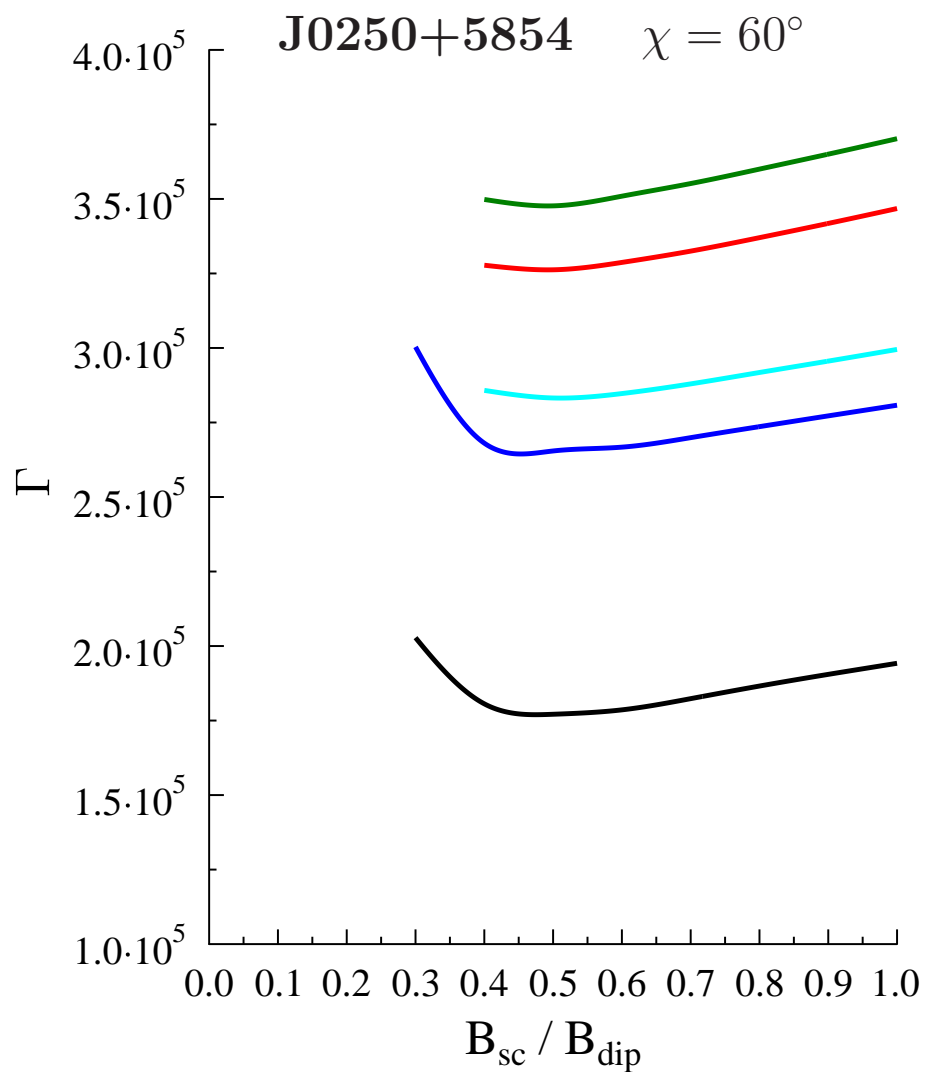
$$\dot{E} = 8.2 \cdot 10^{28} \text{ эрг/с}$$

$$D_{DM} = 1.56 \text{ кпк [6]}$$

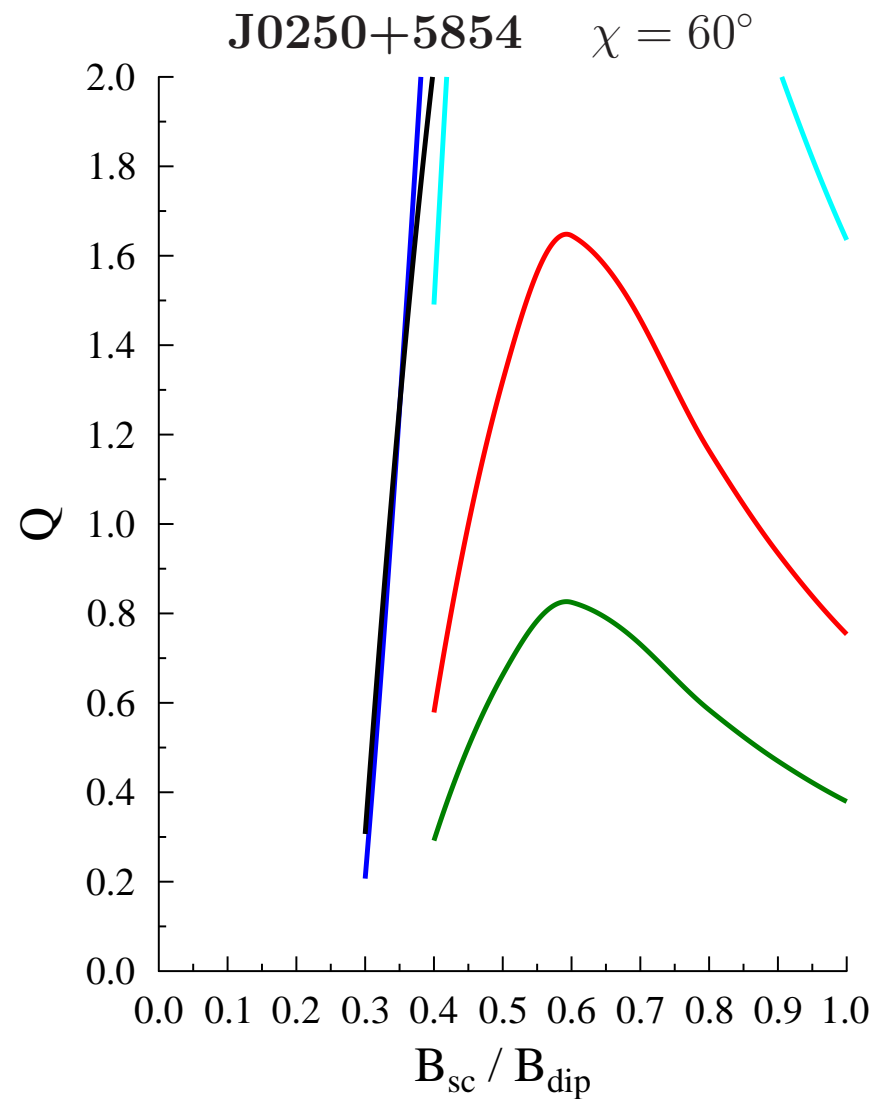
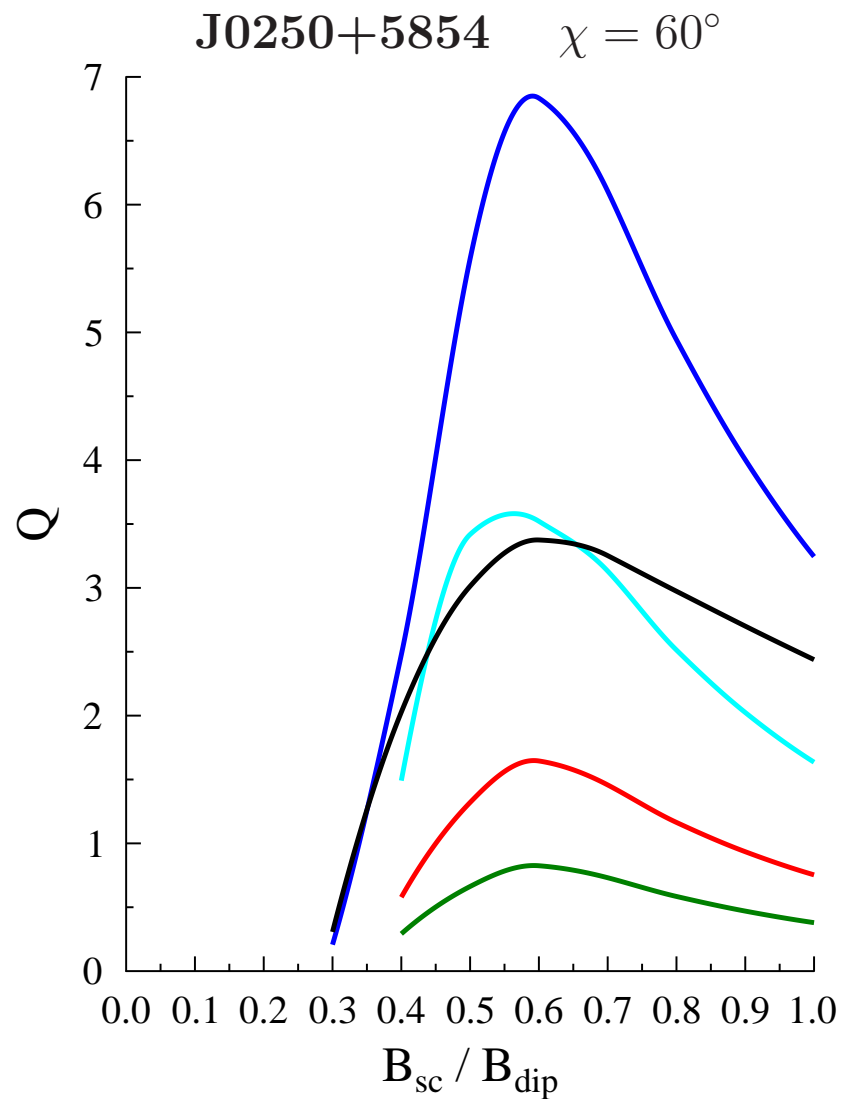
предположим, что

1. $\chi = 60^\circ$ и $\Delta = 0.05$
2. только изгибное излучение первичных электронов
3. фотоионизация позитрониев только фотонами с поверхности звезды

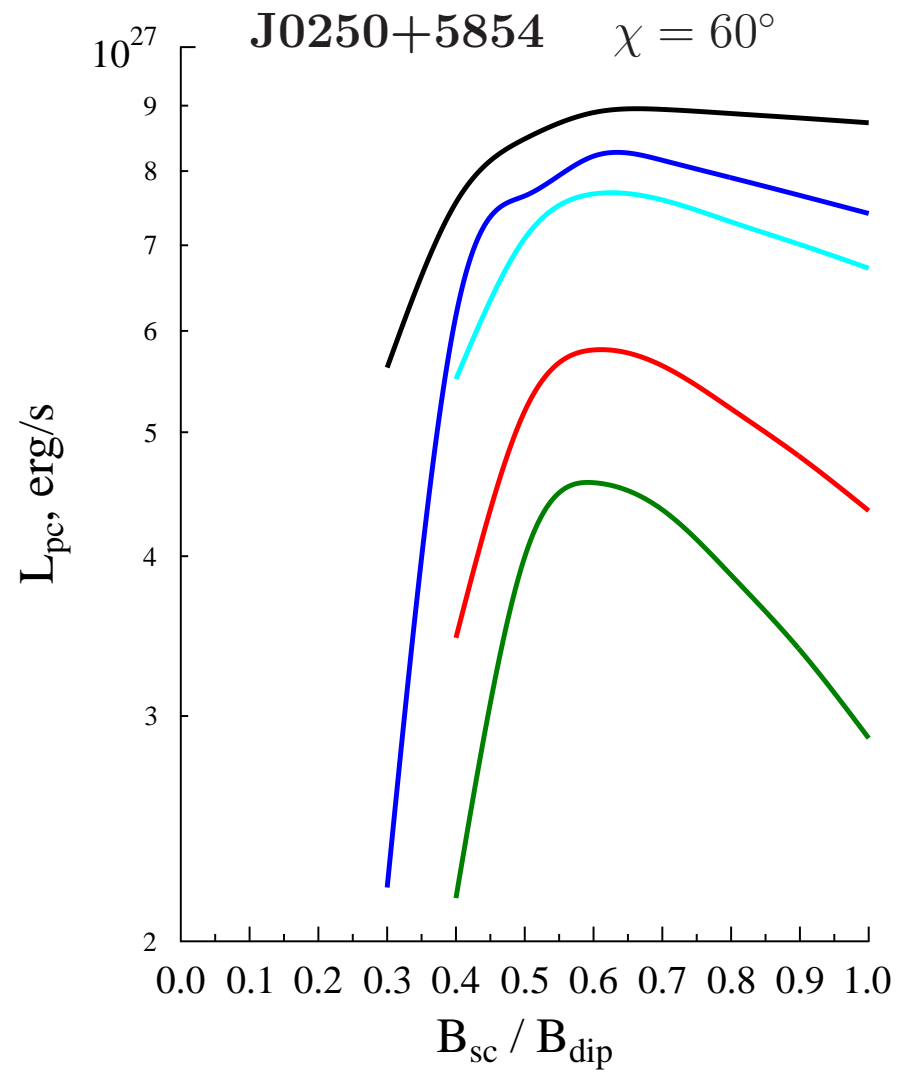
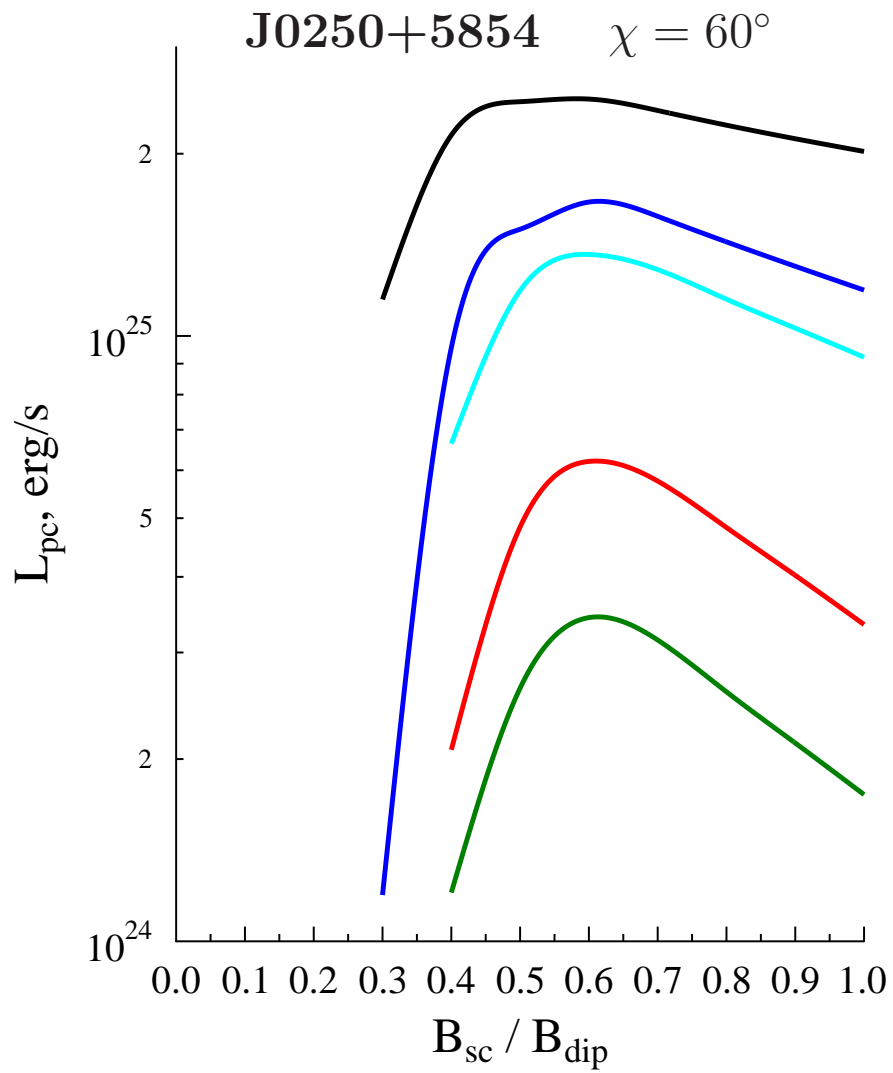
На рисунках черной кривой показан случай $W_0 = +\infty$ (все позитронии мгновенно фотоионизируются). Остальные кривые соответствуют $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$. Синяя кривая соответствует температуре поверхности нейтронной звезды $T_{surf} = 3 \cdot 10^5 \text{ K}$ и $f = 1$, голубая кривая – $T_{surf} = 3 \cdot 10^5 \text{ K}$ и $f = 0.5$. Красная кривая соответствует температуре поверхности нейтронной звезды $T_{surf} = 10^5 \text{ K}$ и $f = 1$, зеленая кривая – $T_{surf} = 10^5 \text{ K}$ и $f = 0.5$.



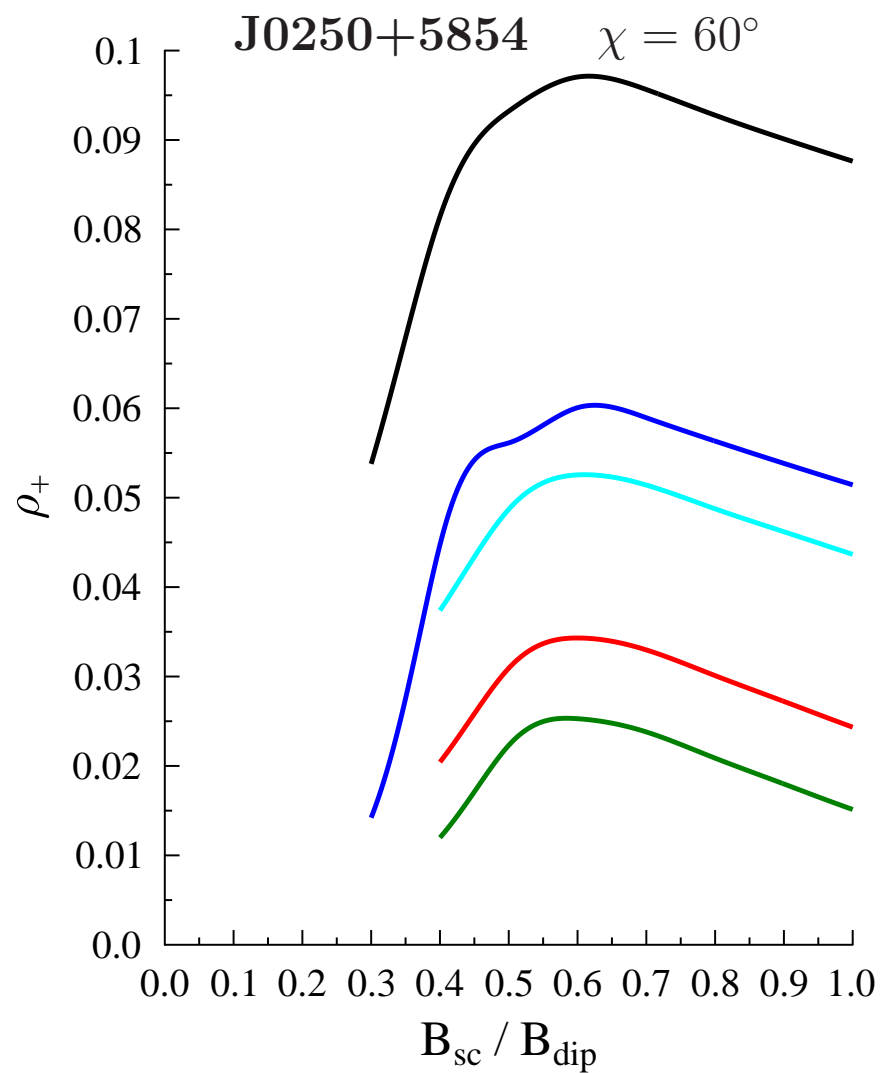
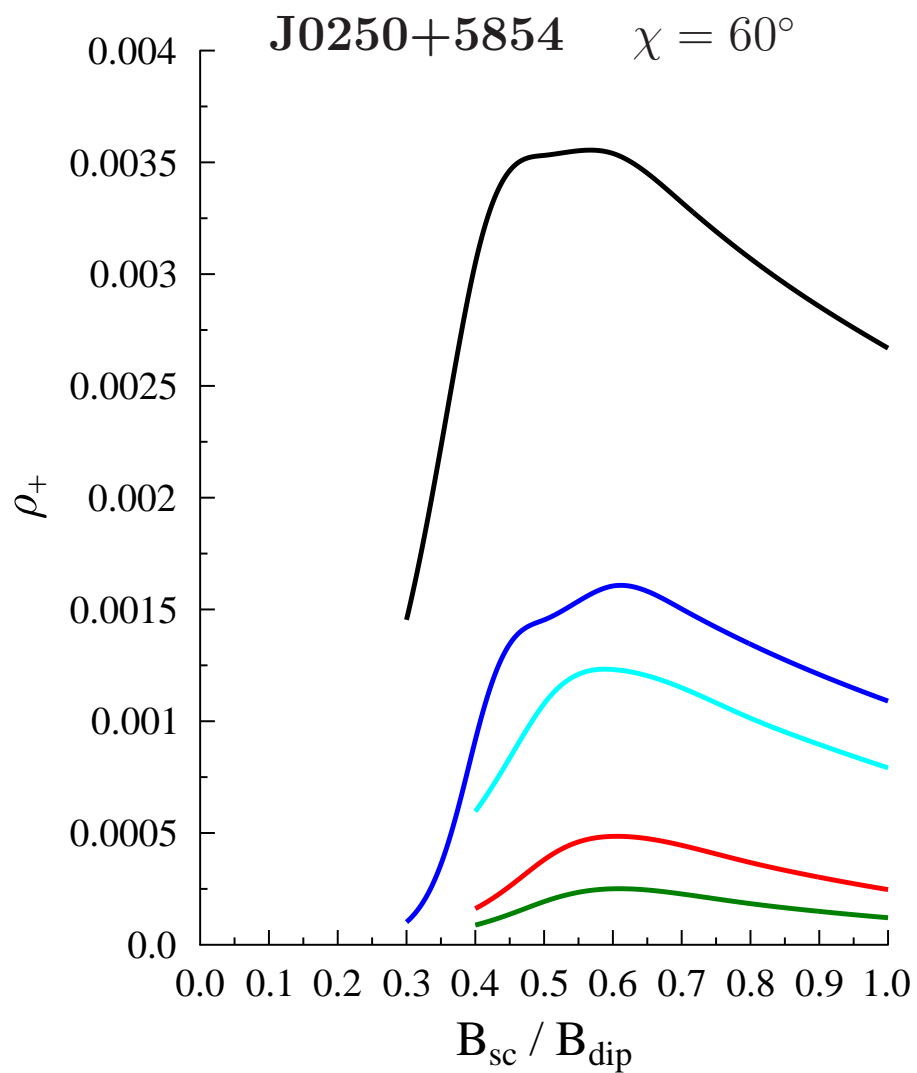
На левом рисунке показан лоренц фактор $\Gamma = \frac{eV}{mc^2}$ первичных электронов. На правом рисунке высота показана верхней обкладки z_{hi} в единицах r_{ns} . Нижняя черная кривая соответствует высоте нижней обкладки z_{lo} .



Коэффициент умножения Q – сумма числа электрон-позитронных пар, родившихся несвязанными, и числа фотоионизированных позитрониев, приходящихся на 1 первичный электрон. Рисунки отличаются только масштабом.



На левом рисунке показана светимость полярной шапки для случая быстрой экранировки [9], на правом – для случая медленной экранировки [10].



На левом рисунке показана величина обратного тока позитронов ρ_+ в единицах $\frac{\Omega B}{2\pi e}$ для случая быстрой экранировки [9], на правом – для случая медленной экранировки [10].

Проблемы

1. Мелкомасштабное поле с $\ell \sim 50$ м при возрасте $\tau = 13.7 \cdot 10^6$ лет.
Почему до сих пор не распалось ?
2. Температура поверхности звезды $T_{surf} \approx 10^5$ К
при $\tau = 13.7 \cdot 10^6$ лет.
Почему до сих пор не остыла ?
3. Холловский аттрактор [8] ?
4. Расщепление фотонов.
5. Нестационарные колебания, искры.
6. Корректный учет фотоионизации позитрониев.
7. Корректный учет аннигиляции позитрониев.

Авторы благодарят Д.А. Румянцева, А.Н. Тимохина, И.Ф. Малова, В.М. Конторовича, Д.Н. Собьянина и В.А. Урпина за полезную дискуссию и ценные замечания, А.И. Чугунова, М.Е. Гусакова, А.В. Бирюкова, Ю.А. Шибанова, А.А. Даниленко, М.А. Гарасёва и В.М. Конторовича за поддержку и ценные замечания.

Список литературы

- [1] V.V.Usov, D.B. Melrose // *Australian Journal of Physics*, V.48, p. 571 (1995)
- [2] H. Herold, H. Ruder, G. Wunner // *Phys. Rev. Letters*, V. 54 , p. 1452 (1985)
- [3] J. Gil, G. Melikidze, B. Zhang // *Astrophysics and Space Science*, V. 308, p. 325 (2007)
- [4] M.G. Baring, A.K. Harding // *ApJ* V. 547 , p. 929 (2001)
- [5] M.G. Baring // "Photon Splitting and Pair Conversion in Strong Magnetic Fields" *Computing Anticipatory Systems: CASYS'07-Eighth International Conference. AIP Conference Proceedings*, V. 1051 , p. 53 (2008)
- [6] R.N. Manchester et al // *Astron. J.*, V. 129, p. 1993 (2005)
<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat>
- [7] S. Guillot et al // *ApJ*, V.874, p.175 (2019)
- [8] A.P. Igoshev, S.B. Popov // *Research Notes of the American Astronomical Society*, V.2, id 171 (2018)
- [9] Arons J., Fawley W.M., Scharlemann E.T. // *ApJ*, V.231, p.854 (1979)
- [10] Harding A.K., Muslimov A.G. // *ApJ*, V.556 p.987 (2001)
- [11] Yu.E. Lyubarskii // *A&A* V.261 p.544 (1992)
- [12] В.Д.Пальшин, А.И.Цыган "Рентгеновское излучение полярных областей радиопульсаров. Недипольное поле." *Препринт Физ.-тех. ин-та им. А.Ф.Иоффе N 1718 (С.-Петербург, 1998)*
- [13] A.Szary // *arXiv:1304.4203*
- [14] Е.М.Кантор, А.И.Цыган // *Астрон. журн.*, т.80, с.665 (2003)
- [15] Д.П. Барсуков, О.А. Гогличидзе, А.И. Цыган // *Астрон. журн.*, т.93, с.569 (2016)