

Влияние мелкомасштабного магнитного поля и
темпа фотоионизации позитрониев
на нагрев полярной шапки пульсара B0656+14

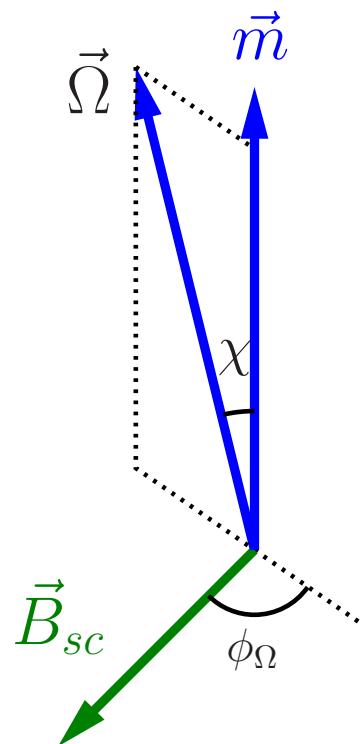
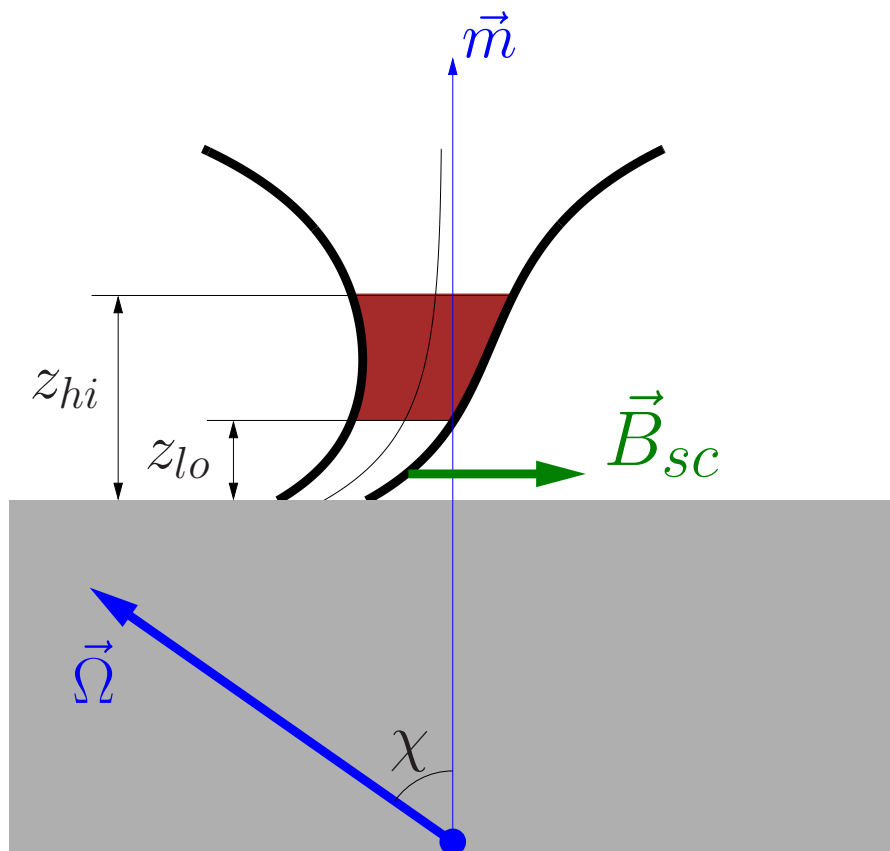
Барсуков Д.П.^{1,2}, Воронцов М.В.²

1 - ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2 - СПбПУ

Аннотация

Рассматривается влияние величины и направления мелкомасштабного магнитного поля на обратный ток позитронов во внутренних зазорах пульсара B0656+14 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 изгибающего 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. Рассмотрено как зависит нагрев полярной шапки от темпа фотоионизации позитрониев.

Мелкомасштабное поле

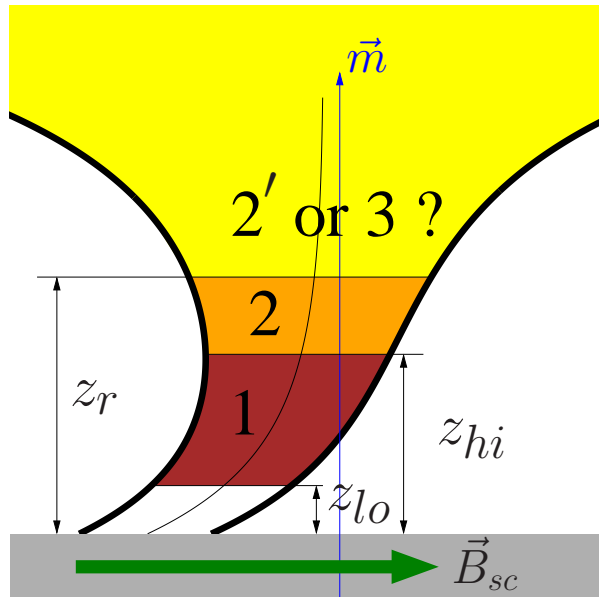


$$\vec{B} = \frac{3\vec{r}(\vec{r} \cdot \vec{m}) - \vec{m}r^2}{r^5} + \frac{3\vec{\rho}(\vec{\rho} \cdot \vec{m}_1) - \vec{m}_1\rho^2}{\rho^5}$$

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

$$\ell = \frac{1}{10}r_{ns} \quad \nu = \frac{B_{sc}}{B_{dip}} \lesssim 1 \quad 0 \leq \phi_\Omega \leq \frac{\pi}{2}$$

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 [12]

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 [13]

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

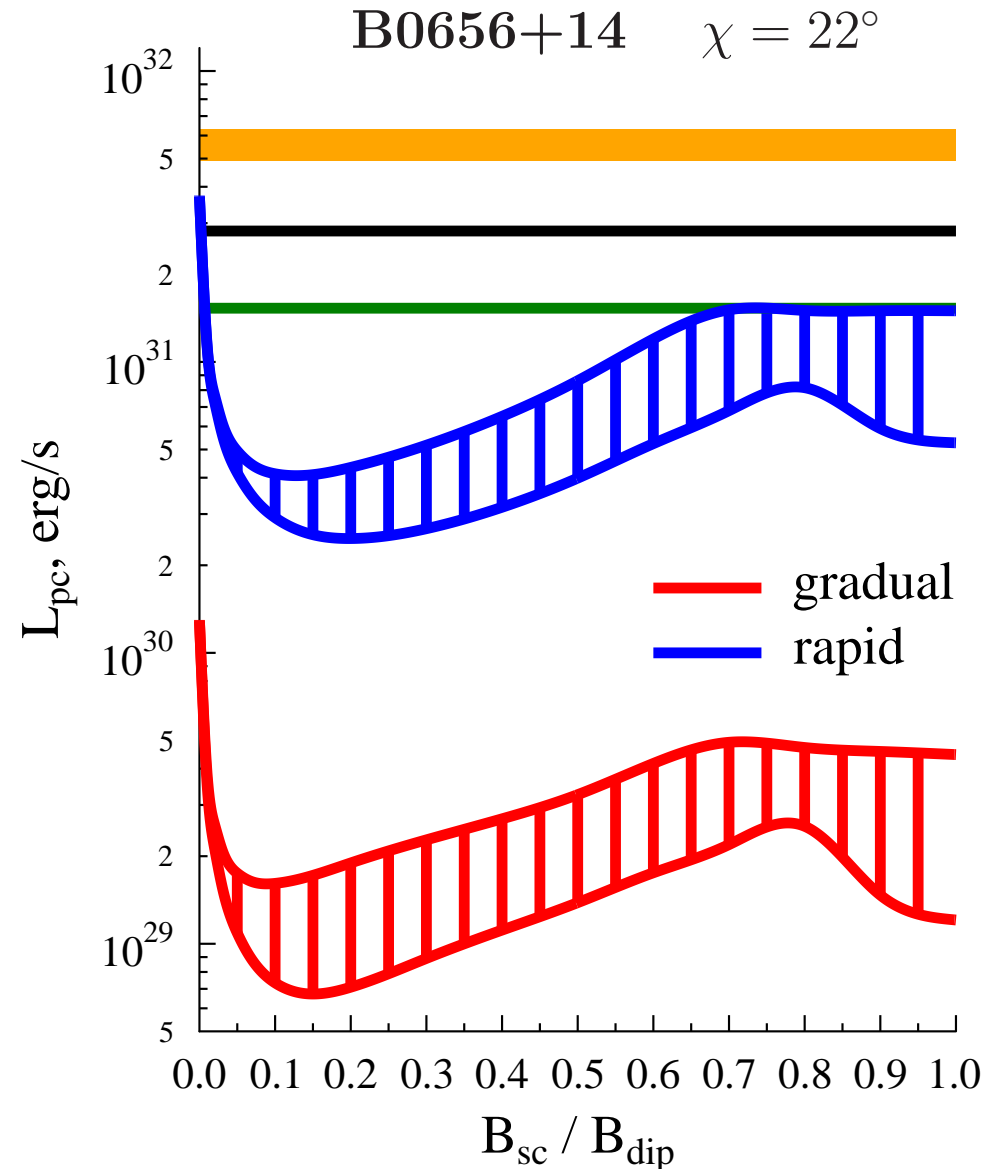
$$W_0 \approx 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1} [1]$$

или

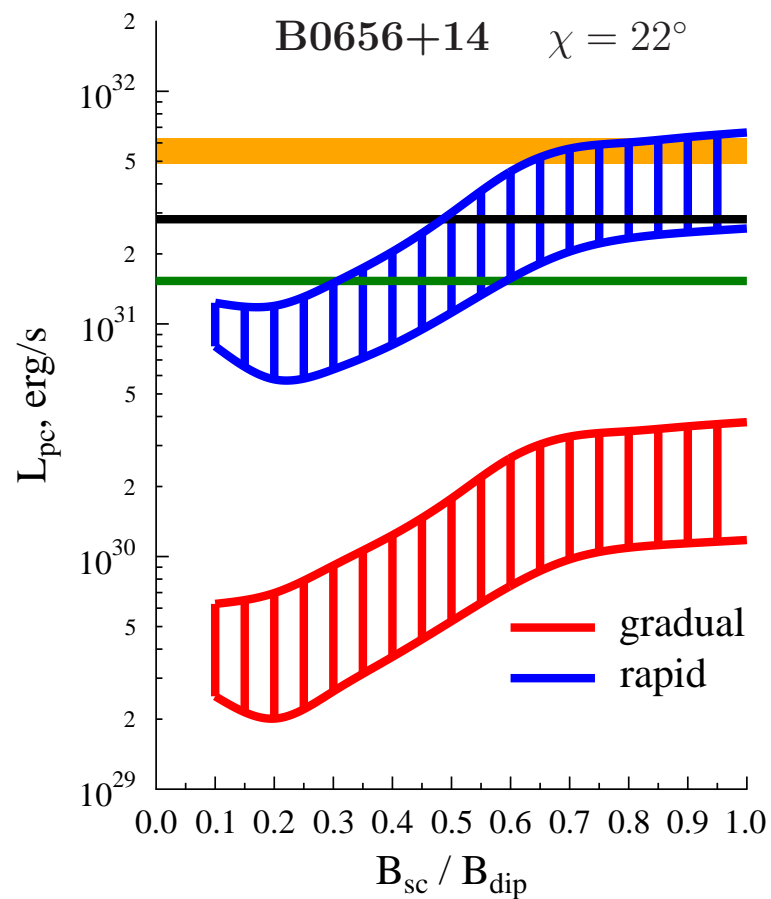
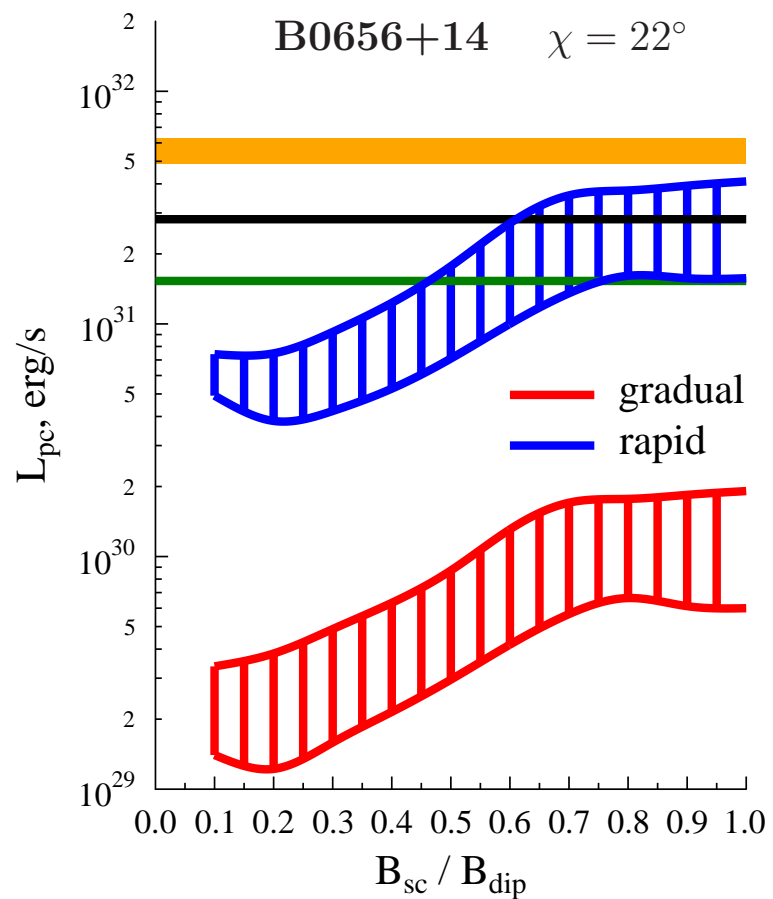
$$W_0 \sim 10^8 \text{сек}^{-1} [2] ?$$

Светимость полярной шапки пульсара B0656+14

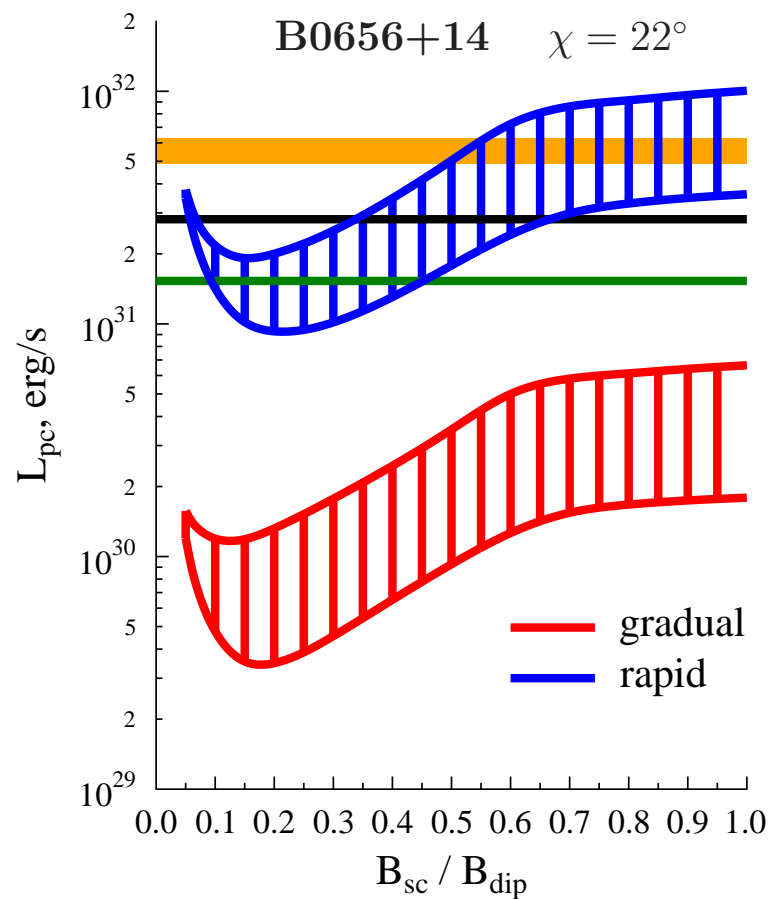
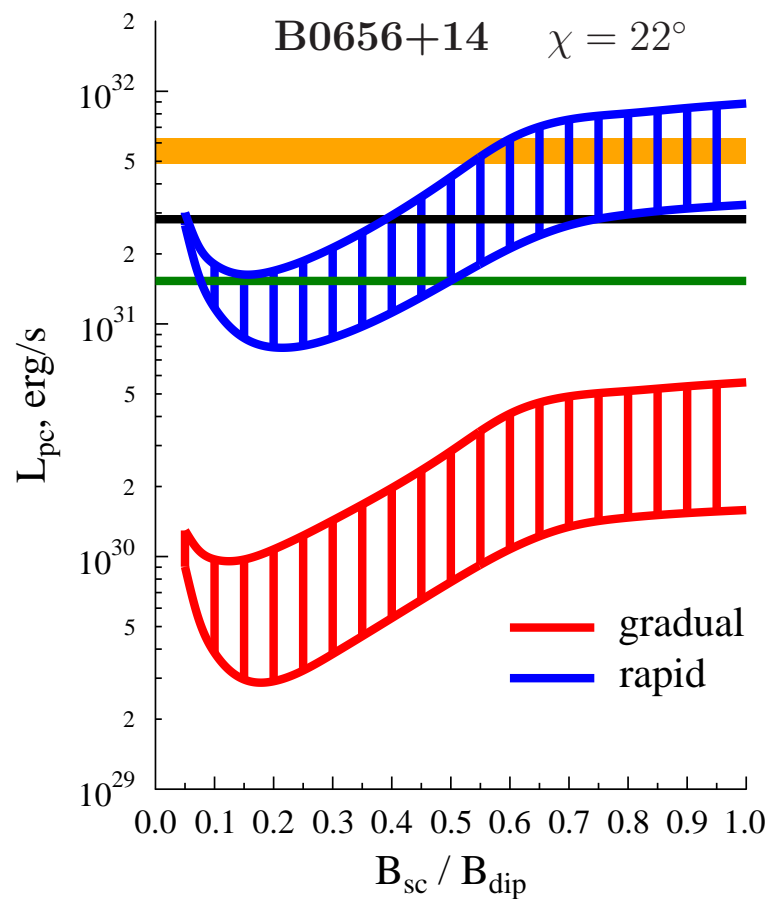
На рисунке представлены возможные значения L_{pc} для пульсара B0656+14
 $B_{dip} = 9.3 \cdot 10^{12}$ Гс, $P = 0.385$ с
 $\tau = 1.1 \cdot 10^5$ лет, $\chi = 22^\circ$ [9],
 $\dot{E} = 3.8 \cdot 10^{34}$ эрг/с [7]. $\chi = 22^\circ$ [9] для
 различных значений угла ϕ_Ω и
 напряженности B_{sc} . Нижние границы
 обеих областей соответствуют $\phi_\Omega = \frac{\pi}{2}$,
 верхнии границы – $\phi_\Omega = 0$.
 Желтой полосой показана L_{pc} из [8],
 L_{pc} из [10] показана черной линией, L_{pc}
 из [11] показана зеленой линией.



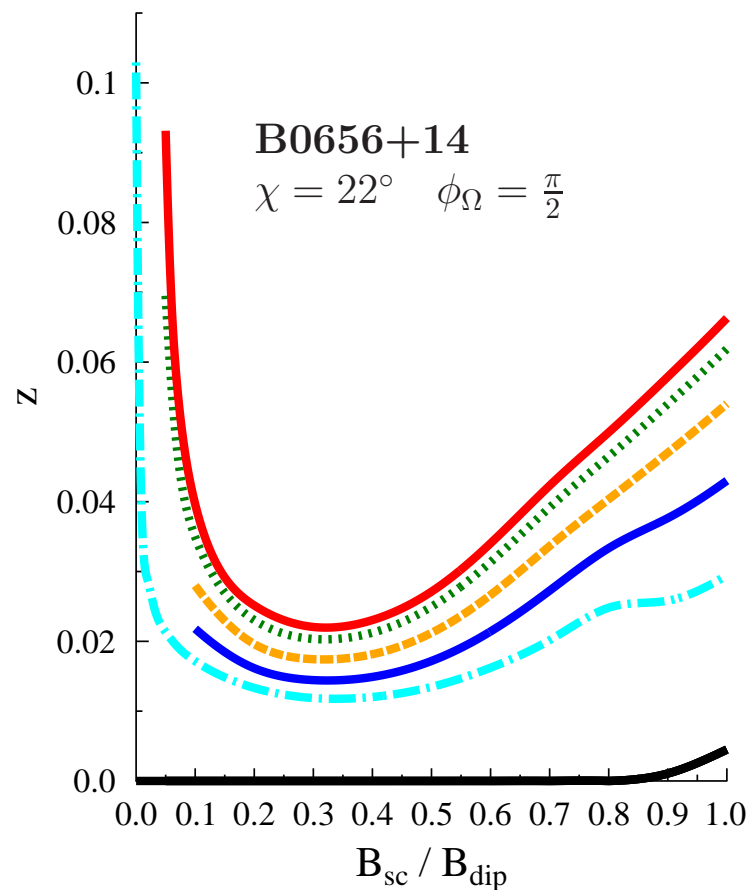
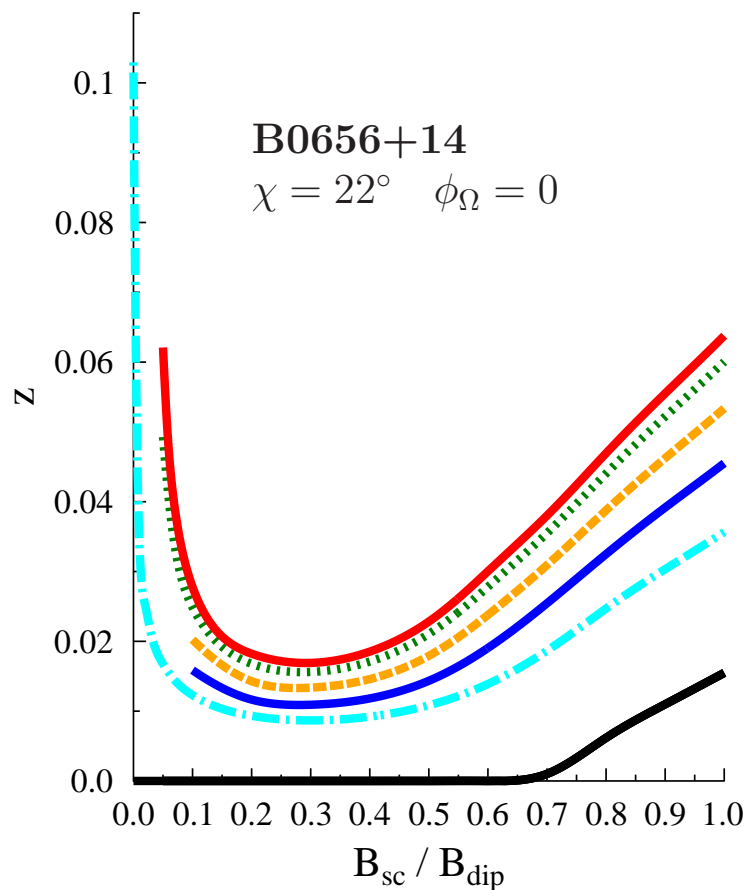
$W_0 = +\infty$ (все пары рождаются не связанными)



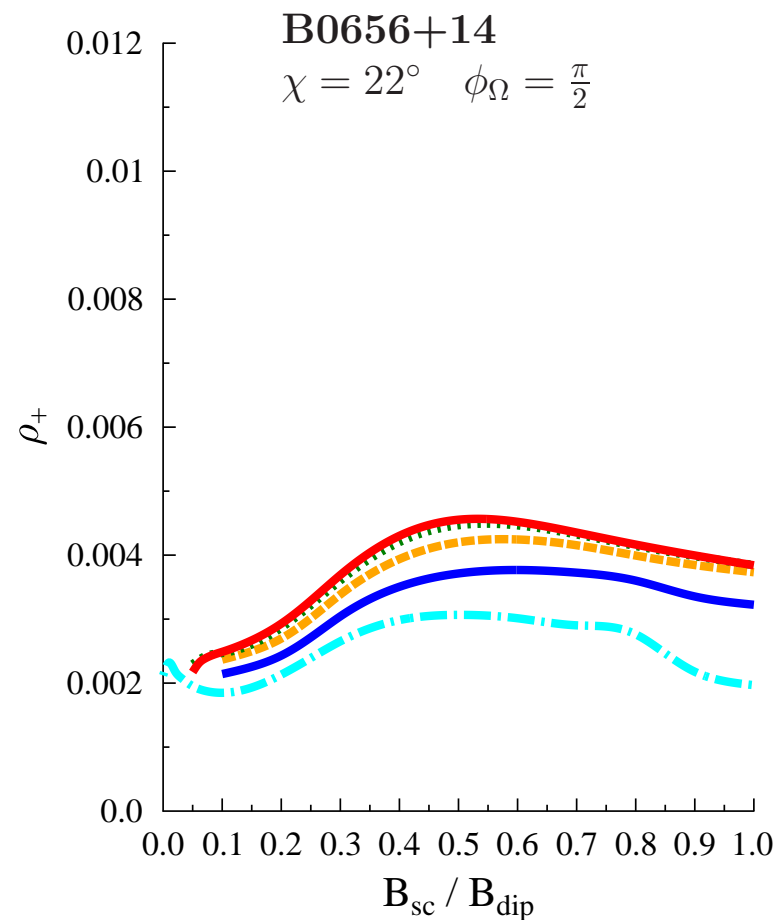
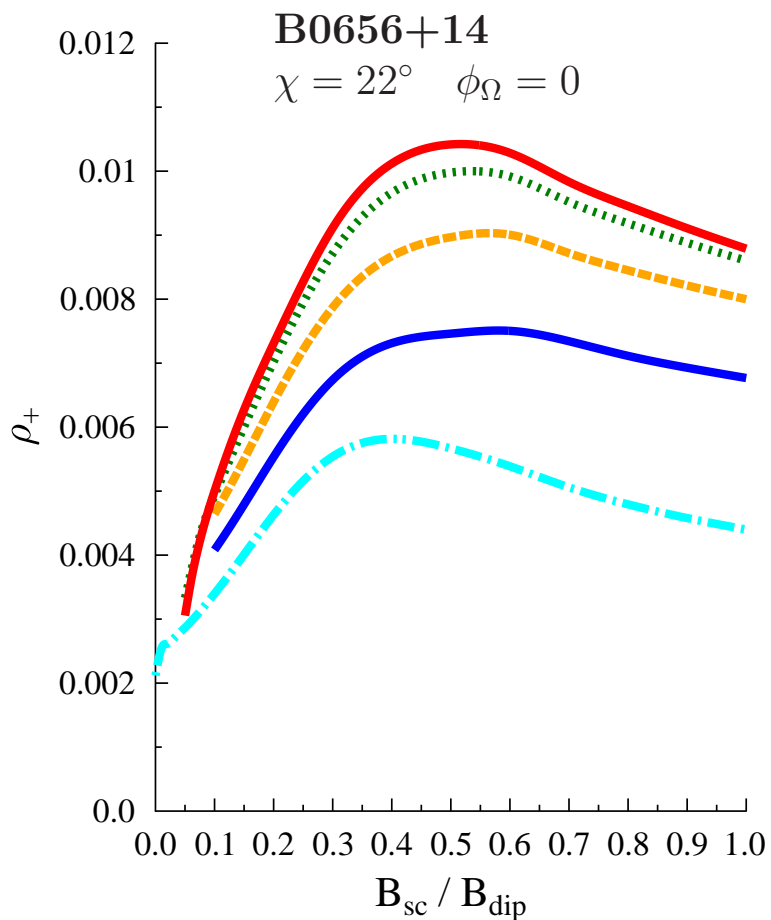
На левом рисунке показан нагрев шапки для случая $W_0 = 1.2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$,
на правом – для случая $W_0 = 6 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$.



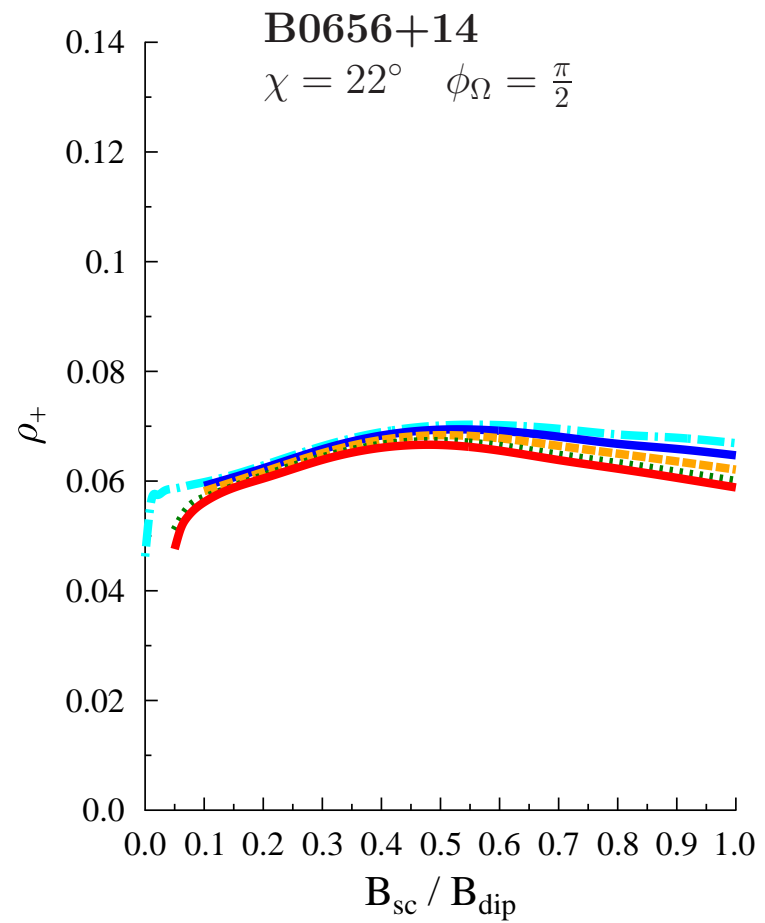
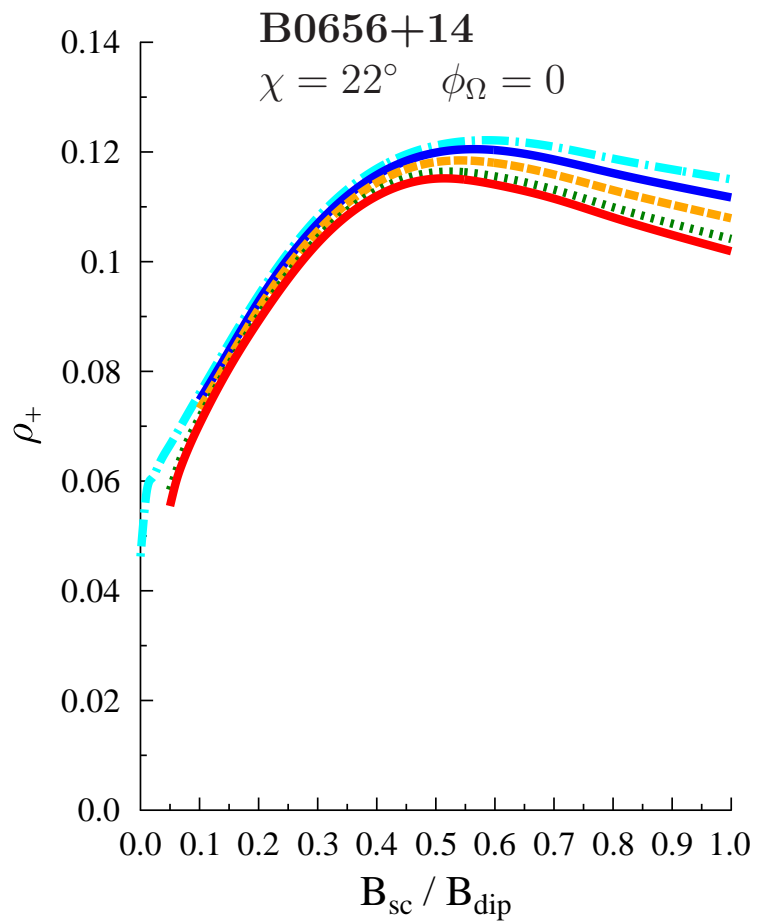
На левом рисунке показан нагрев шапки для случая $W_0 = 1.2 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$,
на правом – для случая $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$.



На левом рисунке показана высота верхней обкладки диода для $\phi_\Omega = 0$, на правом – для $\phi_\Omega = \frac{\pi}{2}$.
 Случай $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$ показан красной кривой, $W_0 = 1.2 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ зеленая кривая,
 $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$ желтая кривая, $W_0 = 1.2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$ синяя кривая, случай $W_0 = +\infty$ (все пары
 рождаются несвязанными) показан голубой кривой. Высота нижней обкладки диода показана черной
 кривой.



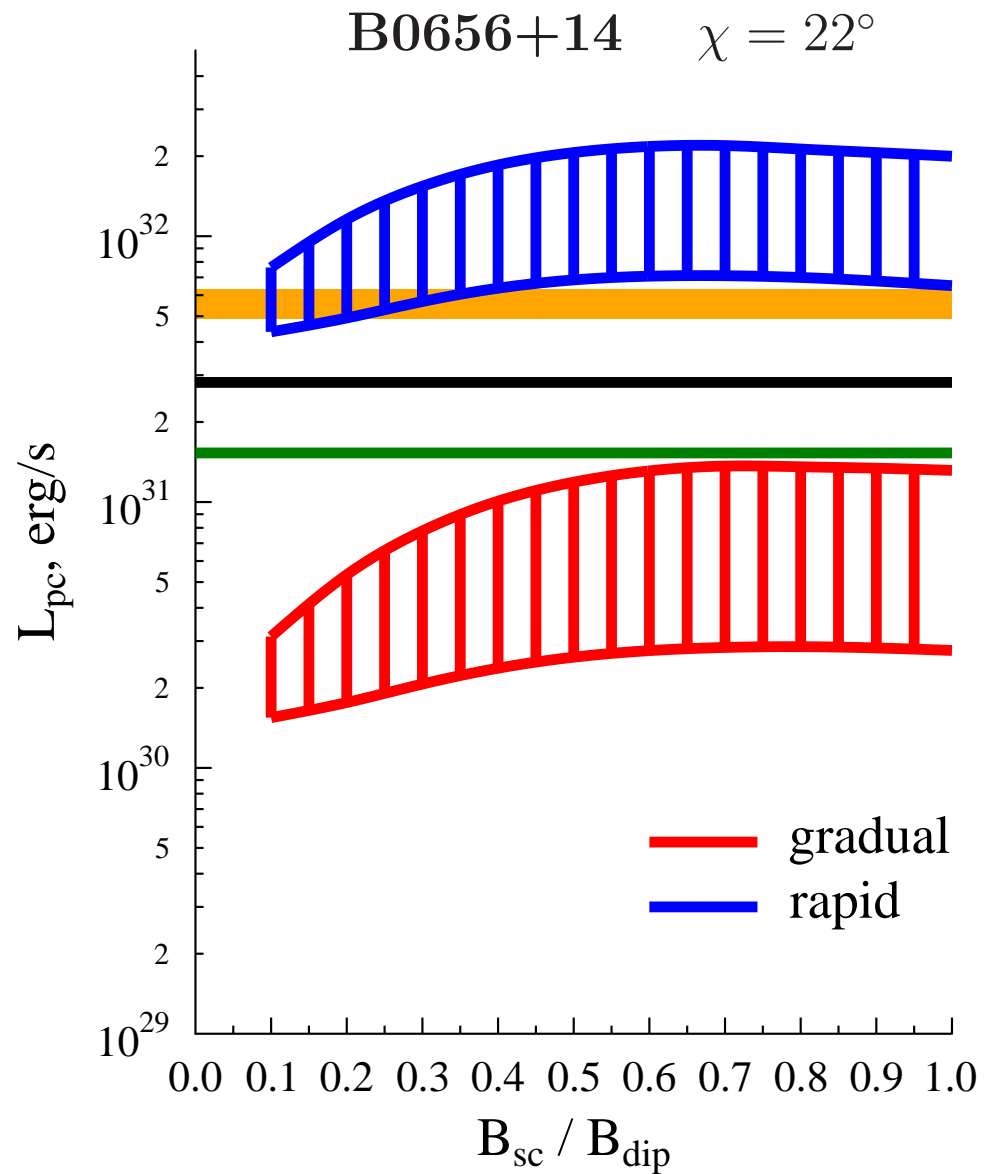
На левом рисунке показана величина обратного тока позитронов ρ_+ в единицах $\frac{\Omega B}{2\pi e}$ в случае быстрой экранировки [12] для $\phi_\Omega = 0$, на правом – для $\phi_\Omega = \frac{\pi}{2}$. Случай $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$ показан красной кривой, $W_0 = 1.2 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ зеленая кривая, $W_0 = 6 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ желтая кривая, $W_0 = 1.2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$ синяя кривая, случай $W_0 = +\infty$ (все пары рождаются несвязанными) показан голубой кривой.



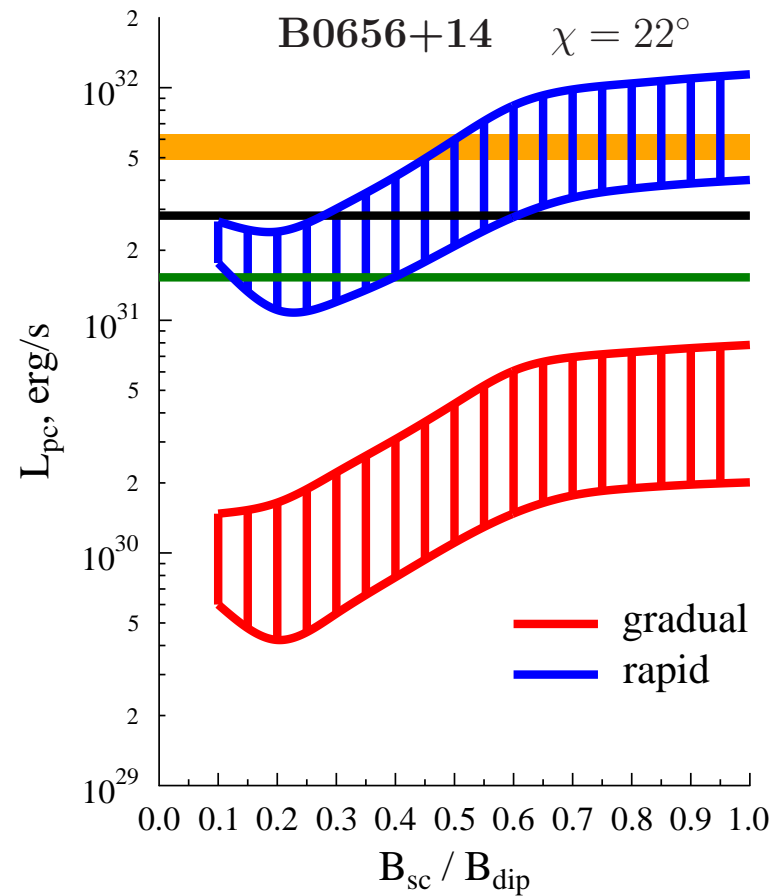
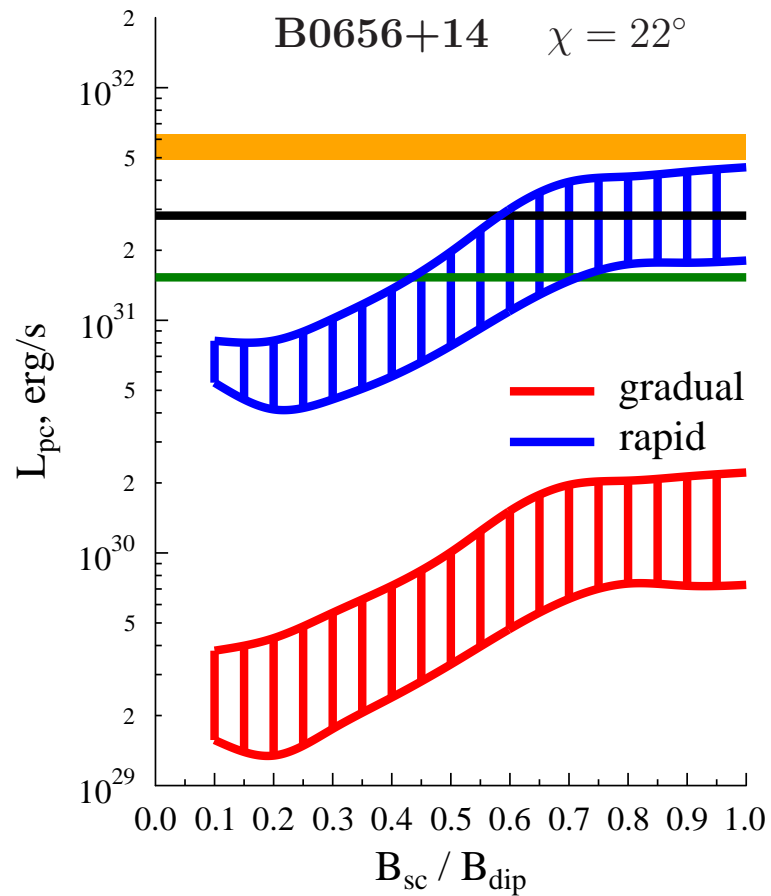
Тоже что на предыдущем рисунке, но для случая медленной экранировки [13].

Предположим что

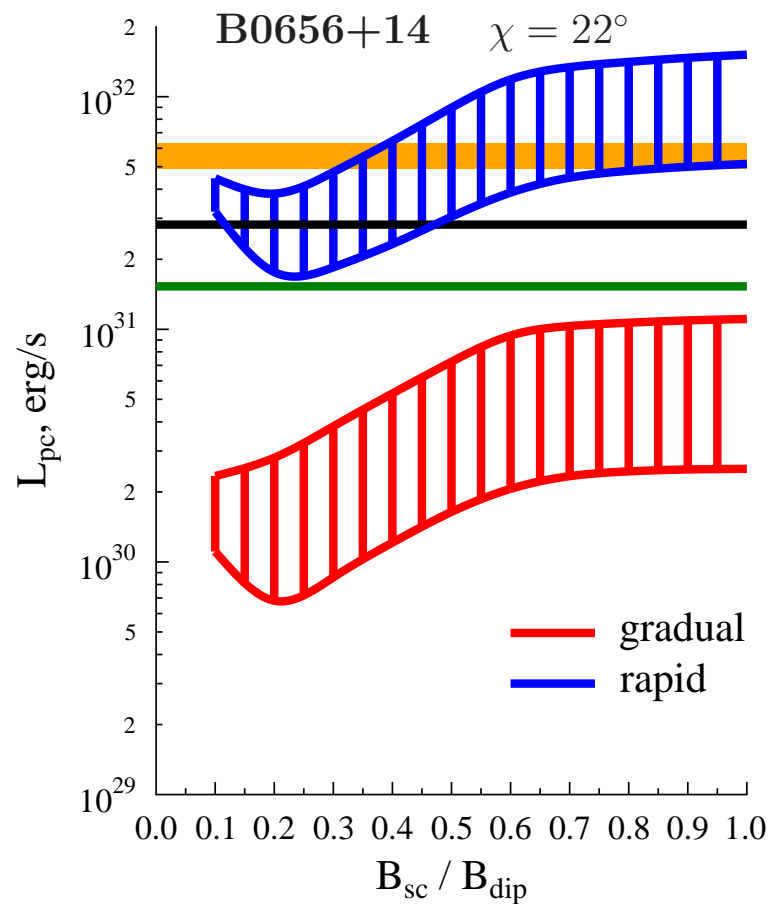
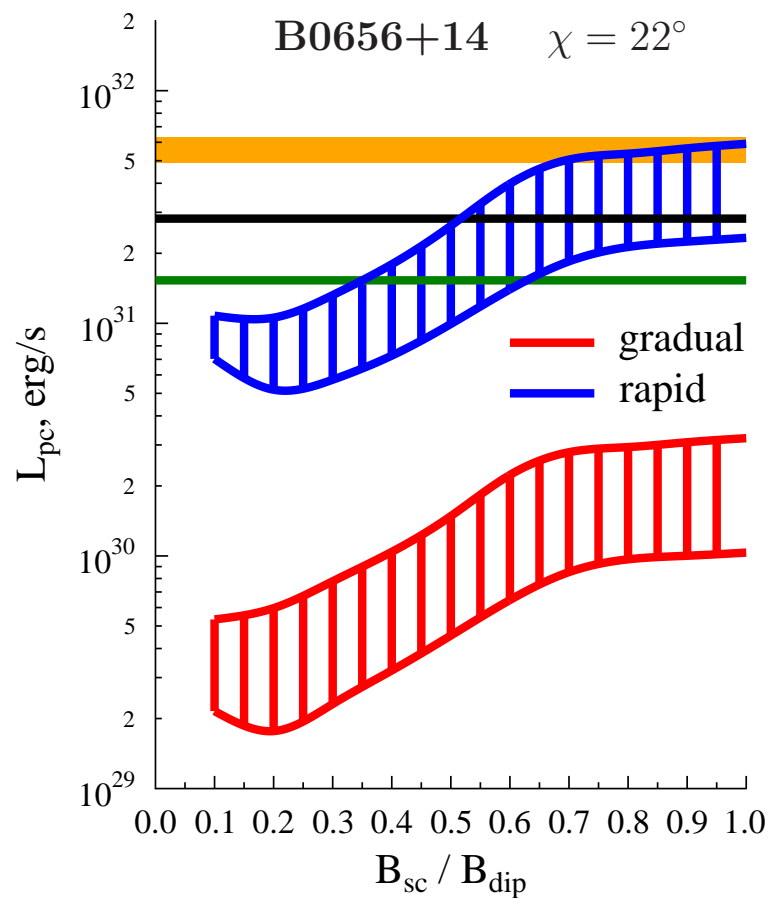
1. $(1 - f)$ позитрониев мгновенно распадается
2. f позитрониев не распадается вообще



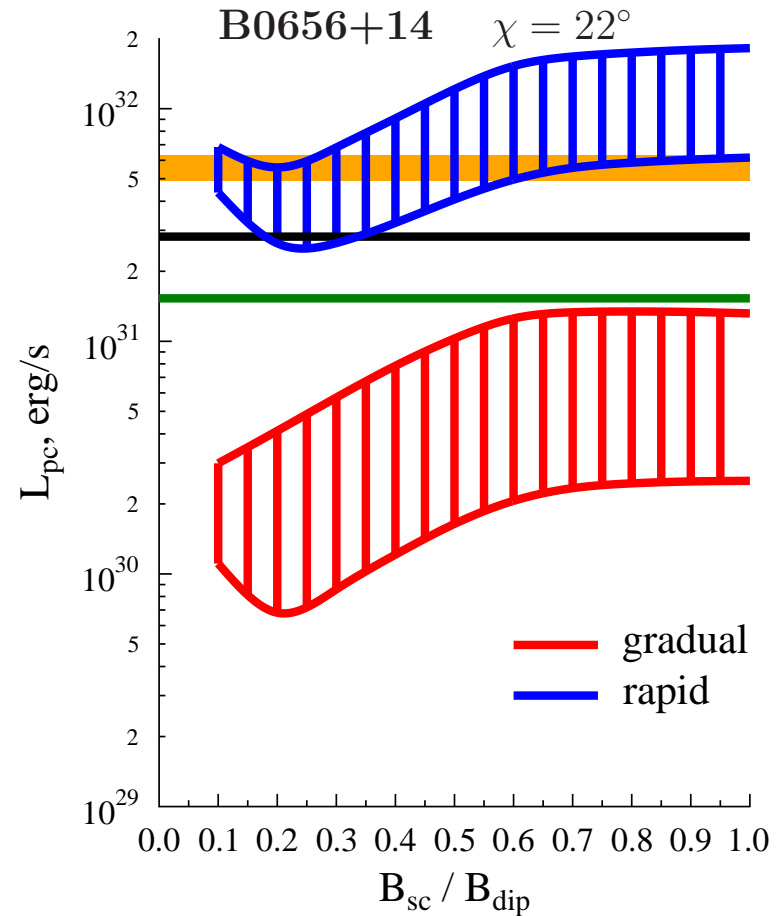
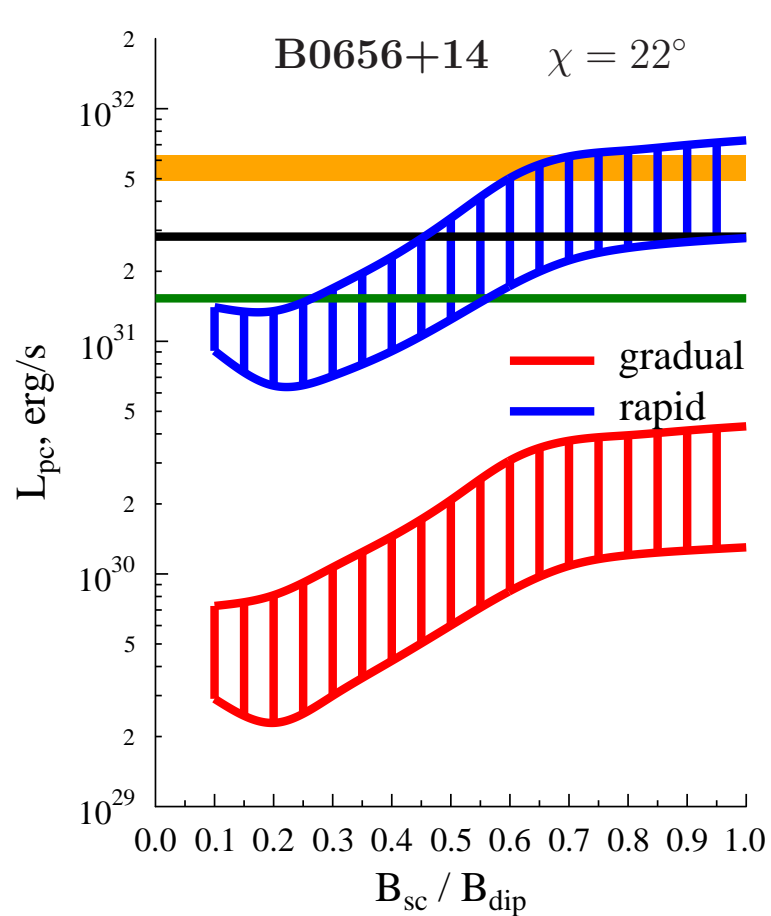
$f = 0$ все позитронии мгновенно распадаются



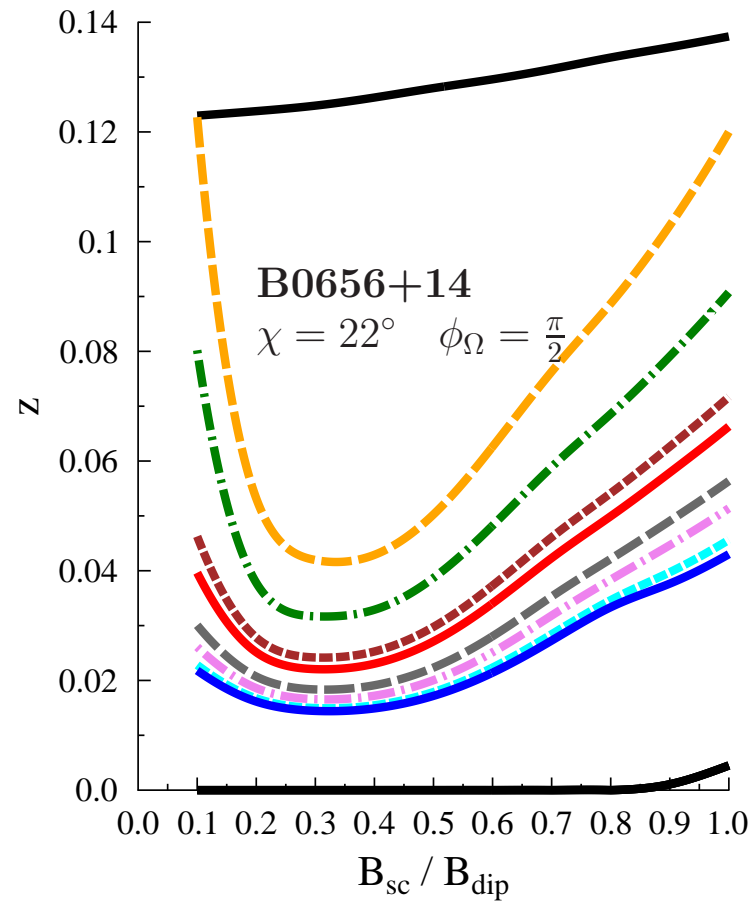
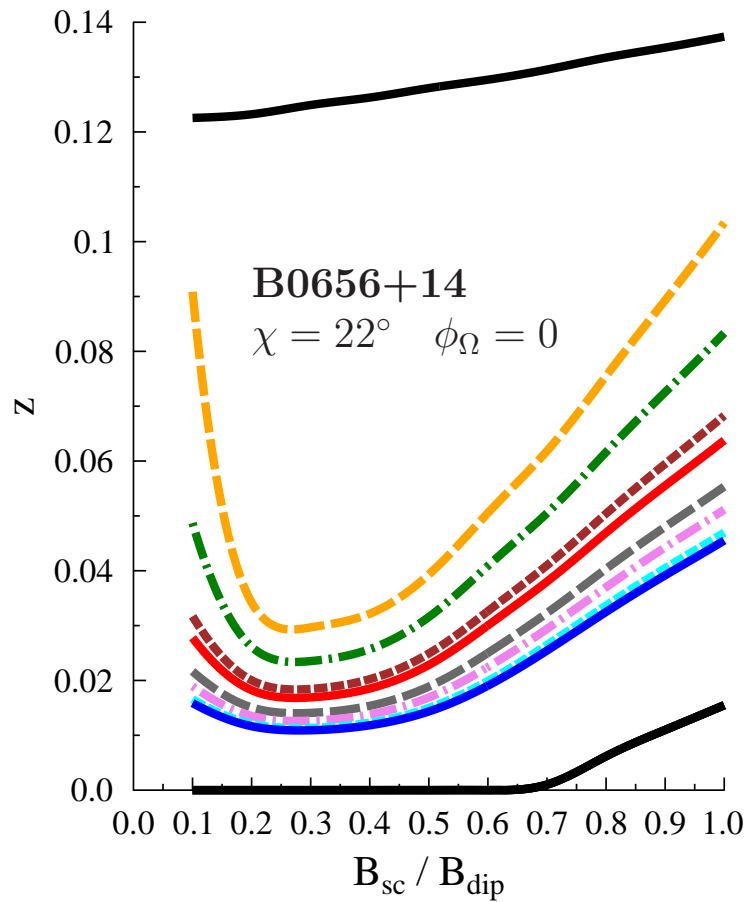
На левом рисунке показан нагрев шапки для случая $W_0 = 1.2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$,
 на правом – для случая $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$.
 Для обоих рисунков $f = 0.5$



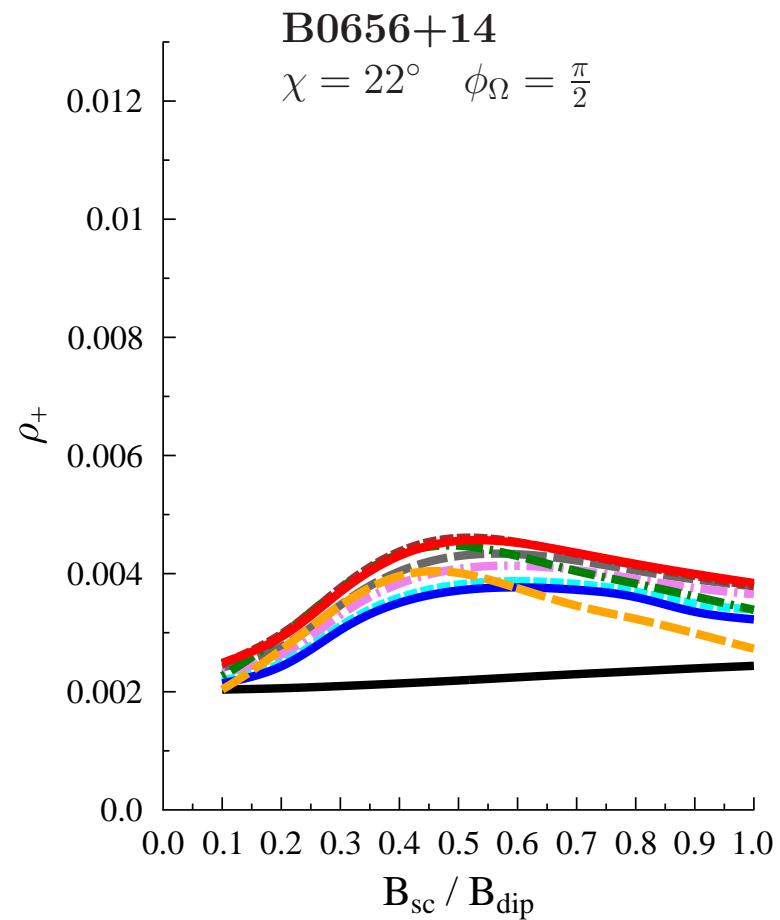
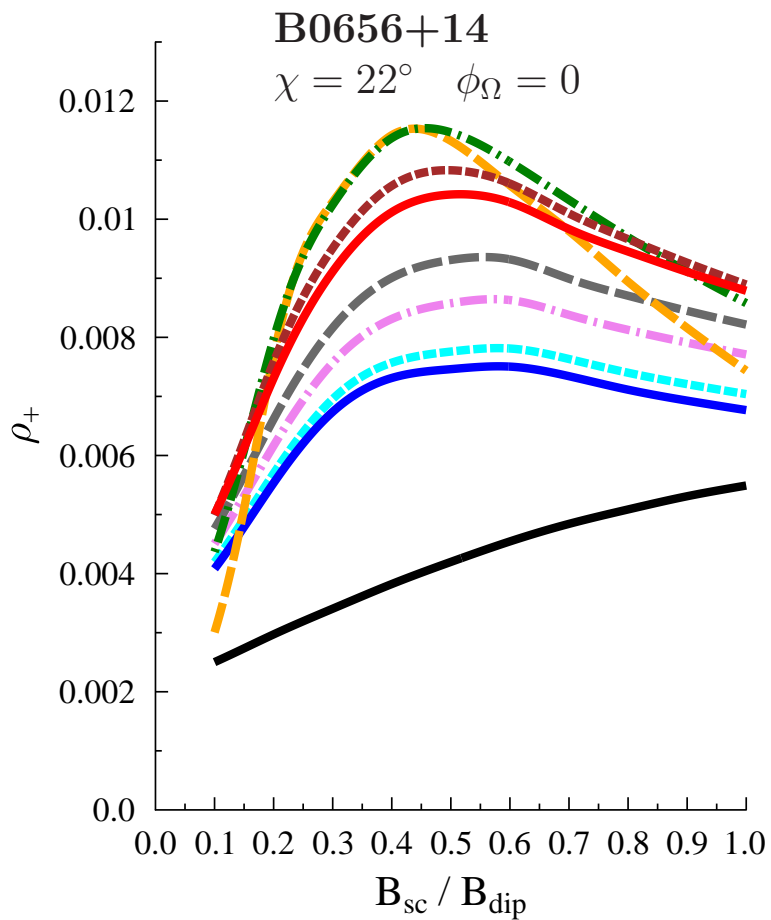
На левом рисунке показан нагрев шапки для случая $W_0 = 1.2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$,
 на правом – для случая $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$.
 Для обоих рисунков $f = 0.1$



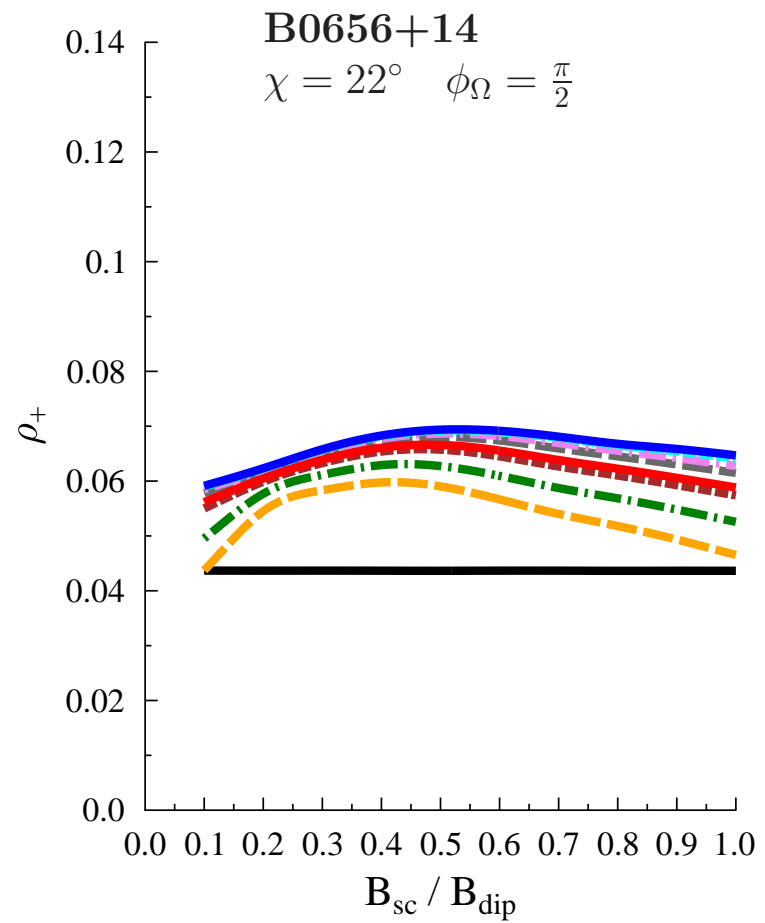
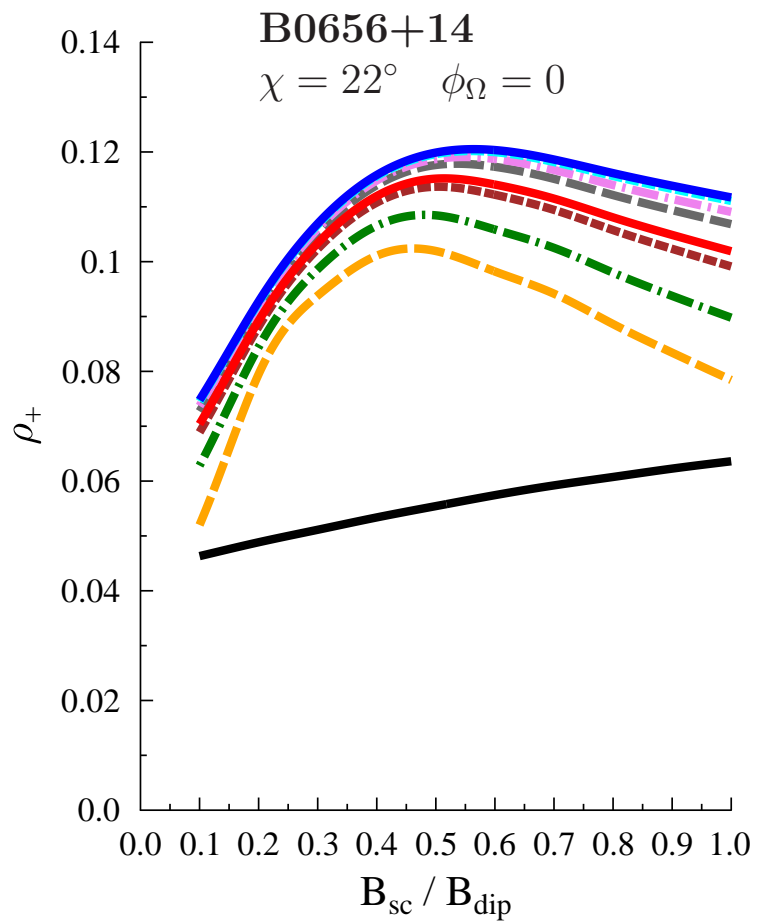
На левом рисунке показан нагрев шапки для случая $W_0 = 1.2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$,
 на правом – для случая $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$.
 Для обоих рисунков $f = 0.03$



На левом рисунке показана высота верхней обкладки диода для $\phi_\Omega = 0$, на правом – для $\phi_\Omega = \frac{\pi}{2}$.
 Случай $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$, $f = 1.0$ показан красной сплошной кривой, $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$, $f = 0.5$ – коричневой пунктирной кривой, $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$, $f = 0.1$ – зеленой штрих-пунктирной кривой, $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$, $f = 0.03$ – желтой штриховой кривой, $W_0 = 1.2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$, $f = 1.0$ – синей сплошной кривой, $W_0 = 1.2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$, $f = 0.5$ – голубой пунктирной кривой, $W_0 = 1.2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$, $f = 0.1$ – фиолетовой штрих-пунктирной кривой, $W_0 = 1.2 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$, $f = 0.03$ – серой штриховой кривой, случай $f = 0$ (все позитроны мгновенно распадаются) показан черной сплошной кривой. Высота нижней обкладки диода показана черной кривой.



На левом рисунке показана величина обратного тока позитронов ρ_+ в единицах $\frac{\Omega B}{2\pi e}$ в случае быстрой экранировки [12] для $\phi_\Omega = 0$, на правом – для $\phi_\Omega = \frac{\pi}{2}$.
 Обозначения кривых те же, что на предыдущем рисунке.



Тоже что на предыдущем рисунке, но для случая медленной экранировки [13].

Результаты

Рассмотрено влияние величины и направления мелкомасштабного магнитного поля на обратный ток позитронов во внутреннем зазоре пульсара B0656+14 и связанный с ним нагрев полярных шапок. Рассмотрено как зависит нагрев полярной шапки от темпа фотоионизации позитрониев. Подтверждается результат [3], что при темпе фотоионизации взятом из [2], нагрев полярной шапки и высота верхней обкладки практически такие же, как если бы все пары рождались в несвязанном состоянии. В случае темпа фотоионизации [1] высота верхней обкладки возрастает примерно в два раза, но нагрев полярной шапки меняется не очень значительно.

Авторы благодарят И.Ф.Малова, В.М.Конторовича, Д.А. Румянцева, Д.Н.Собьянина и В.А. Урпина за полезную дискуссию и ценные замечания, И.Ф.Малова, Е.Б.Никитину и Г.Г.Павлова за полезную дискуссию и предоставленные наблюдательные данные, А.И.Чугунова, М.Е.Гусакова, Е.М.Кантор, Ю.А.Шибанова, А.А.Даниленко, Д.А.Зюзина, А.Ю.Кириченко, М.А.Гарасёва, В.М.Конторовича и Д.М.Седракяна 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] И.Ф. Малов "Радиопульсары" , М. Наука 2004

- [7] R.N. Manchester et al // *Astron. J.*, V. 129, p. 1993 (2005)
<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat>
- [8] J.Gil et al. // *ApJ*, V. 686, p. 497 (2008)
- [9] И.Ф. Малов, Е.Б.Никитина // *Астрон. журн.*, т.88,р.22 (2011)
- [10] A.Szary // *arXiv:1304.4203*
- [11] G. Pavlov, O. Kargaltsev, B. Posselt, M. Durant "X-ray observations of rotation-powered pulsars" *The Fast and the Furious: Energetic Phenomena in Isolated Neutron Stars, Pulsar Wind Nebulae and Supernova Remnants*, held 22-24 May, 2013 in Madrid, Spain. id 9 (2013)
- [12] Arons J., Fawley W.M., Scharlemann E.T. // *ApJ*, V.231 p.854 (1979)
- [13] Harding A.K., Muslimov A.G. // *ApJ*, V.556 p.987 (2001)
- [14] Yu.E. Lyubarskii // *A&A* V.261 p.544 (1992)
- [15] 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)*
- [16] Е.М.Кантор, А.И.Цыган // *Астрон. журн.*, т.80, с.665 (2003)
- [17] Д.П. Барсуков, П.И. Полякова, А.И. Цыган // *Астрон. журн.*, т. 86, с. 1227 (2009)