

**Влияние мелкомасштабного магнитного поля
на нагрев полярных шапок
старых радиопульсаров**

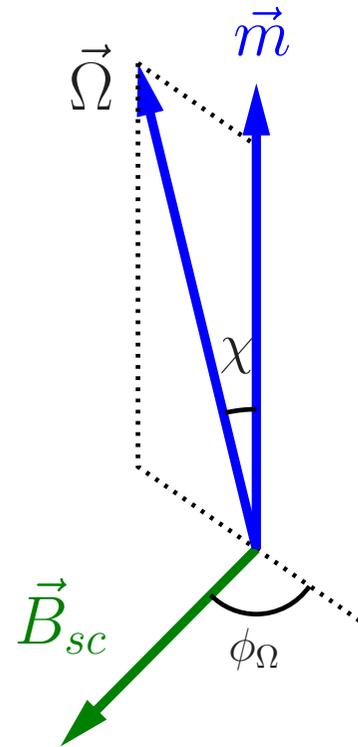
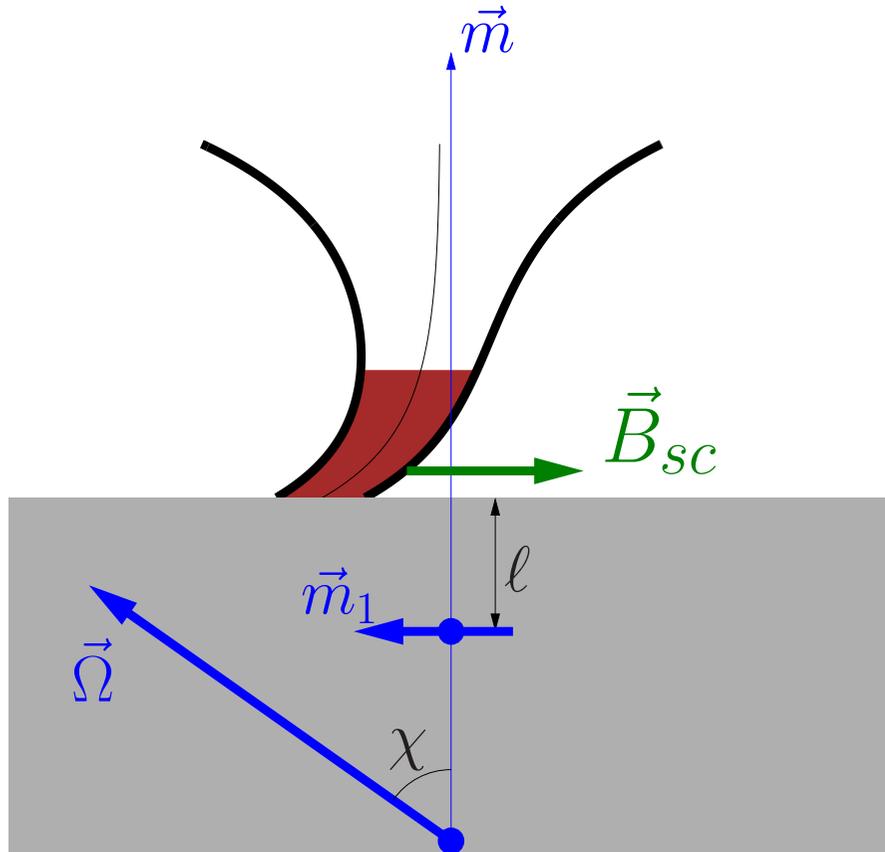
Цыган А.И.¹, Барсуков Д.П.^{1,2}, Краав К.Ю.², Воронцов М.В.²

1 - ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2 - СПбПУ

Аннотация

Рассматривается влияние величины и направления мелкомасштабного магнитного поля на обратный ток позитронов во внутренних зазорах старых радиопульсаров (с характеристическим возрастом $\tau > 10^6$ лет) и связанный с ним нагрев полярных шапок. 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

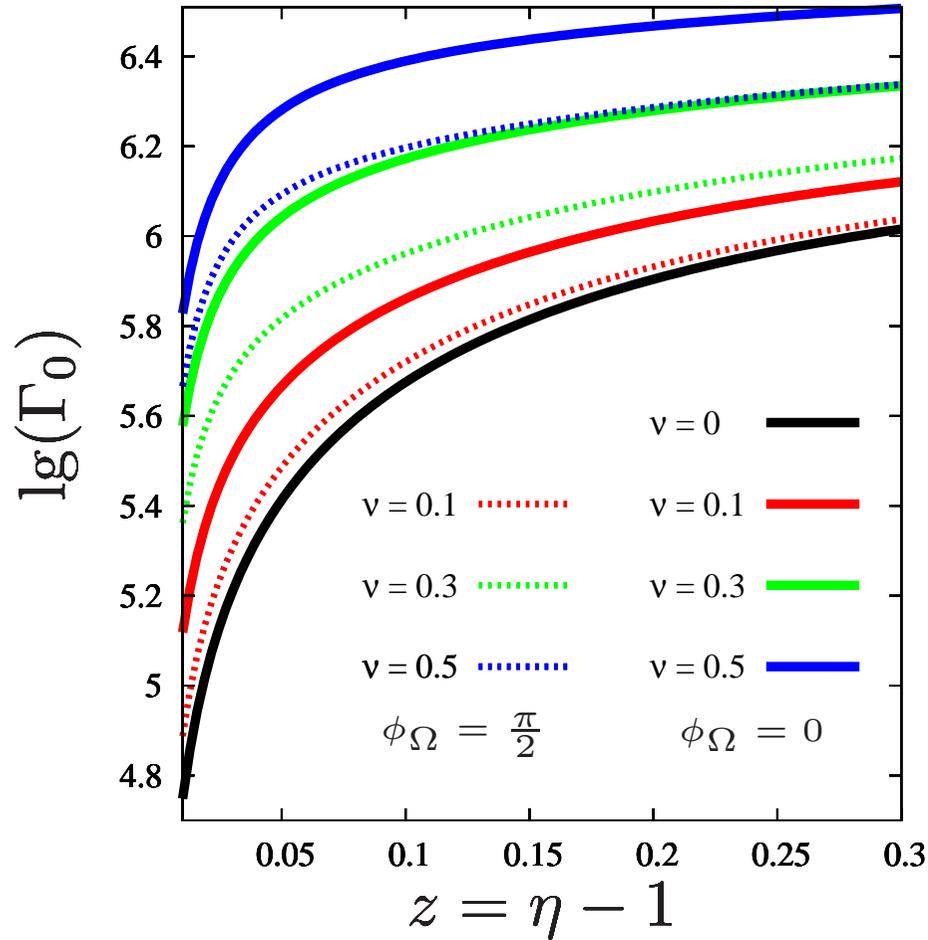


$$\vec{B} = \frac{3\vec{r}(\vec{r} \cdot \vec{m}) - \vec{m}r^2}{r^5} + \frac{3\vec{\rho}(\vec{\rho} \cdot \vec{m}_1) - \vec{m}_1\rho^2}{\rho^5}$$

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

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

Электростатический потенциал



$$\Gamma_0 = \frac{e\Phi}{mc^2} (\eta = 1 + z, \xi = 0, \phi = 0)$$

$$B_0 = 10^{12} \text{ Гс}, P = 1 \text{ с}, \chi = 10^\circ$$

Е.М. Кантор и А.И. Цыган (2003)

$$a\theta_s \ll az_c$$

$$\Phi(\eta, \xi, \phi) = \frac{\Omega F}{2\pi c} (f_{GJ}(\eta) - f_{GJ}(1)) \times (1 - \xi^2)$$

при $0 \leq z = \eta - 1 \leq z_c = \eta_c - 1$

$$\Phi(\eta, \xi, \phi) = \Phi(\eta_c, \xi, \phi)$$

при $z > z_c$

$$F = \pi (\theta_s a)^2 B = \pi (\theta_0 a)^2 B_0$$

$$j = \frac{\Omega B}{2\pi} f_{GJ}(1)$$

$$\rho_{GJ} = \frac{\Omega B}{2\pi c} f_{GJ}(\eta)$$

В случае если $z_c \ll 1$, $z_c \ll \Delta$, $\theta \ll 1$ и $\sin \beta \ll \frac{\theta_s}{z_c}$ или $\frac{z_c}{\theta_s}$, где β – угол между вектором магнитного поля и поверхностью нейтронной звезды, потенциал (10) из [5] может быть переписан в следующем виде:

$$\Phi = 2\Phi_0 K_1 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\gamma_i^2} \left(z + \frac{F(z, \gamma_i)}{\gamma_i} \right) \frac{2}{k_i J_1(k_i)} J_0(k_i \xi)$$

где $\Phi_0 = \frac{\Omega a}{c} B_s a$, B_s – величина магнитного поля в точке ($\eta = 1, \xi = 0, \phi = 0$), $\theta_s a$ – радиус пульсарной трубки (на поверхности нейтронной звезды), χ – угол между \vec{m} и $\vec{\Omega}$, $\gamma_i = \frac{k_i}{\theta_s}$ и k_i – корни уравнения $J_0(k) = 0$

$$F(z, \gamma) = - \frac{(1 - e^{-\gamma z})(1 + e^{-\gamma(z_c - z)})}{1 + e^{-\gamma z_c}}$$

$$K_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \nu^2}} \left((1 - k) \cos \chi - \left(1 + \frac{k}{2}\right) \nu \sin \chi \cos \phi_\Omega \right)$$

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \nu^2}} \left(3k + \frac{3\nu}{\Delta} \frac{\nu}{1 + \nu^2} (1 - \Delta)(1 - k) \right) \cos \chi$$

$$+ \frac{3\nu}{\Delta} \frac{1}{(1 + \nu^2)^{3/2}} \left(1 - \Delta + \frac{k}{2} + \frac{k}{2} \nu^2 \Delta \right) \sin \chi \cos \phi_\Omega$$

и плотность электрического заряда в трубке вычисляется по следующей формуле

$$\rho = \frac{\Omega B}{2\pi c} A(\xi) \quad A(\xi) = -K_0 - K_1 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{\gamma_i} \frac{1 - e^{-\gamma_i z_c}}{1 + e^{-\gamma_i z_c}} \frac{2}{k_i J_1(k_i)} J_0(k_i \xi)$$

В качестве высоты верхней обкладки диода z_c выбирается высота z , на которой на силовой линии ($\xi = 0.5$, $\phi = 0$) коэффициент умножения Q равен 0.1. При этом, при вычислении коэффициента умножения Q , учитывается только генерация электрон-позитронных пар изгибными фотонами.

$$Q = 0.1$$

Обратный ток позитронов вычисляется с помощью уравнения (3) из [4]:

$$\begin{aligned} \rho_{tot}|_{\eta=1} &\approx \frac{\Omega B}{2\pi c} (A_{prim} + A_+ - f_{GJ}(\eta = 1)) \approx 0 \\ \rho_{tot}|_{\eta=\eta_+} &\approx \frac{\Omega B}{2\pi c} (A_{prim} - A_+ - f_{GJ}(\eta = \eta_+)) \approx 0 \end{aligned}$$

где A_{prim} , A_+ и f_{GJ} – плотности первичных электронов, позитронов обратного тока и плотность Голдрайха-Джулиана в единицах $\frac{\Omega B}{2\pi c}$.

Случай $\eta_+ = \eta_c$ соответствует расчету обратного тока по модели Аронса-Шарлеманна [1], а случай $\eta_+ = +\infty$ – расчету в соответствии с моделью Муслимова-Хардинг [2].

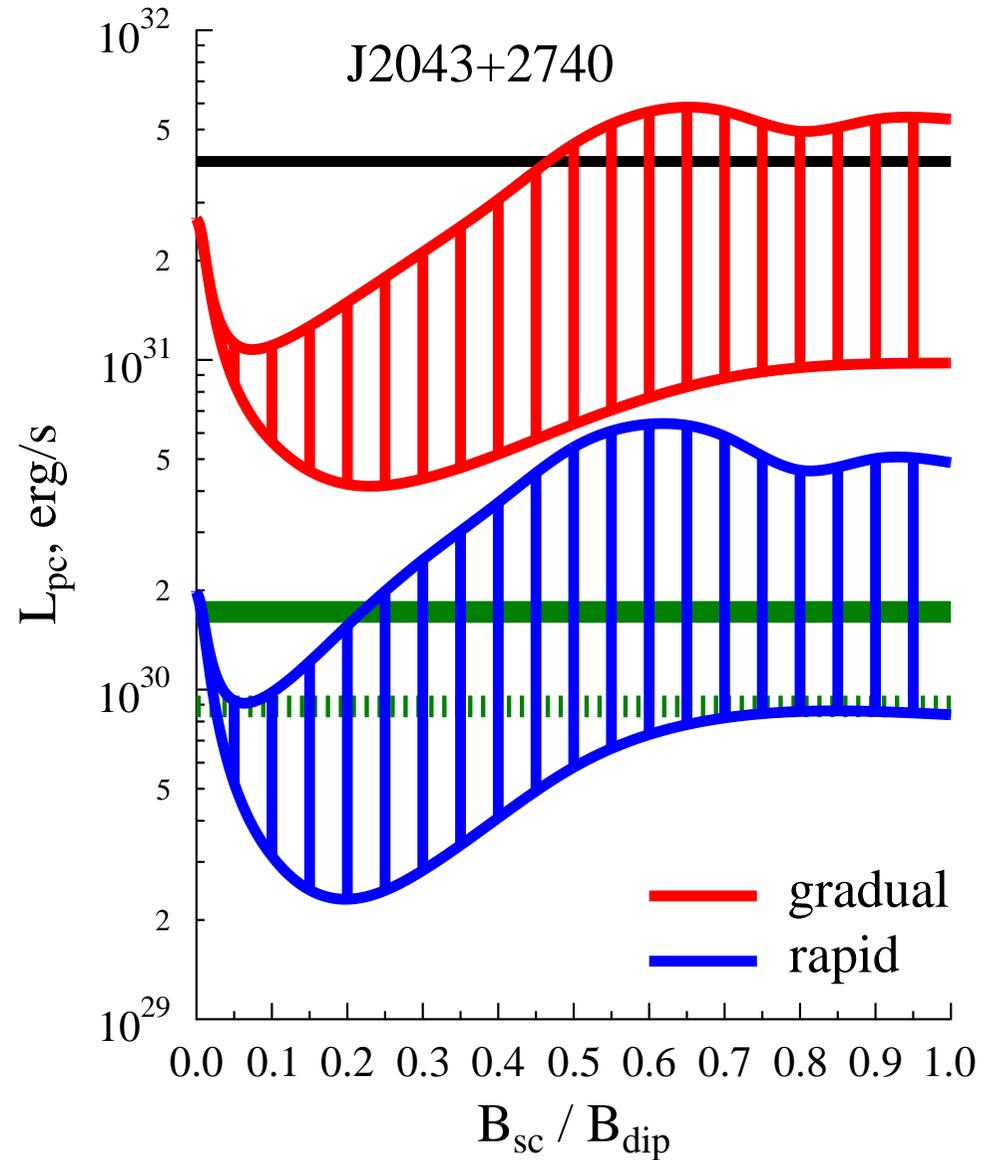
Рентгеновская светимость L_x и температура T полярной шапки оцениваются с помощью формулы:

$$L_x = \sigma \cdot T^4 \cdot S_{pc} = n_+ c \cdot mc^2 \cdot \langle \Gamma \rangle \cdot S_{pc}$$

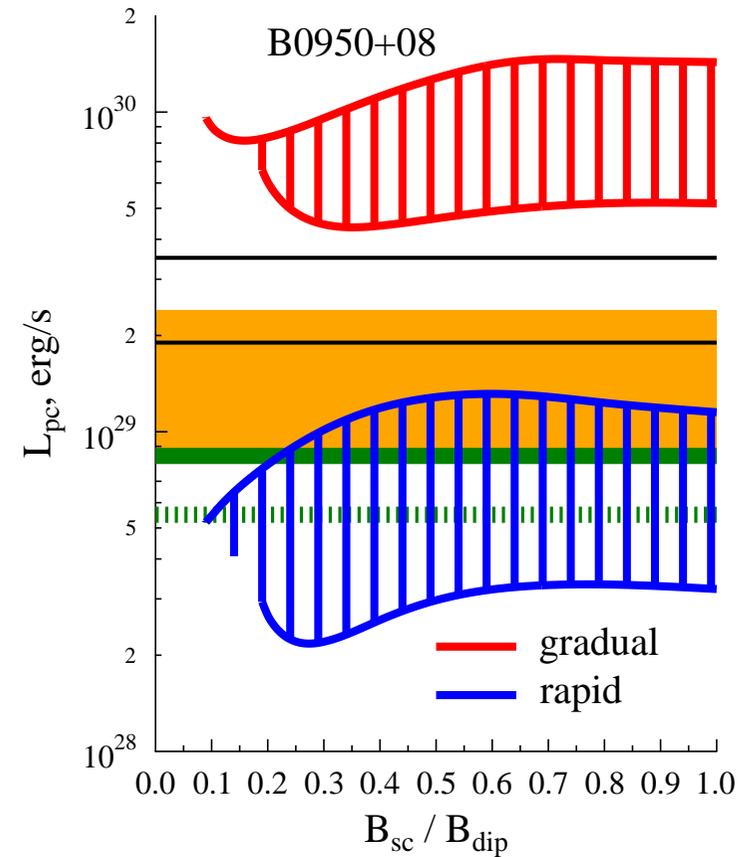
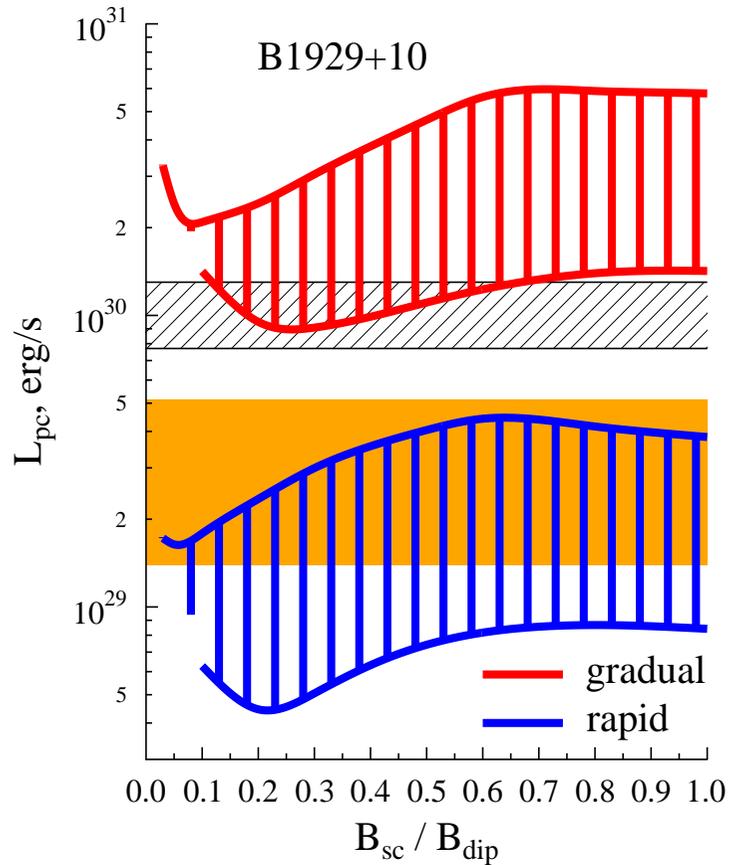
где $n_+ = \frac{\Omega B}{2\pi c e} A_+ \approx 7 \cdot 10^{10} \cdot (B/10^{12} \text{ Гс}) \cdot (1 \text{ сек}/P) \cdot A_+ \text{ см}^{-3}$ – концентрация позитронов обратного тока, а величина $mc^2 \langle \Gamma \rangle$ равна средней энергии первичных электронов на верхней обкладке диода $\eta = \eta_c$, S_{pc} – площадь полярной шапки.

Светимость полярной шапки пульсара J2043+2740

На рисунке представлены возможные значения L_{pc} для пульсара J2043+2740 ($B_{dip} = 7.1 \cdot 10^{11}$ Гс, $P = 96$ мс, $\tau = 1.2 \cdot 10^6$ лет, $\dot{E} = 5.6 \cdot 10^{34}$ эрг/с [7], $\chi = 55^\circ$ [8]) для различных значений угла ϕ_Ω и напряженности B_{sc} . Нижние границы обеих областей соответствуют $\phi_\Omega = \frac{\pi}{2}$, верхние границы – $\phi_\Omega = 0$. Верхние пределы из [9] показаны зелеными линиями: сплошной – если мы видим одну шапку, штриховой – если мы видим обе шапки. Излучение всей поверхности нейтронной звезды из [10] показано черной линией.



Светимость полярной шапки



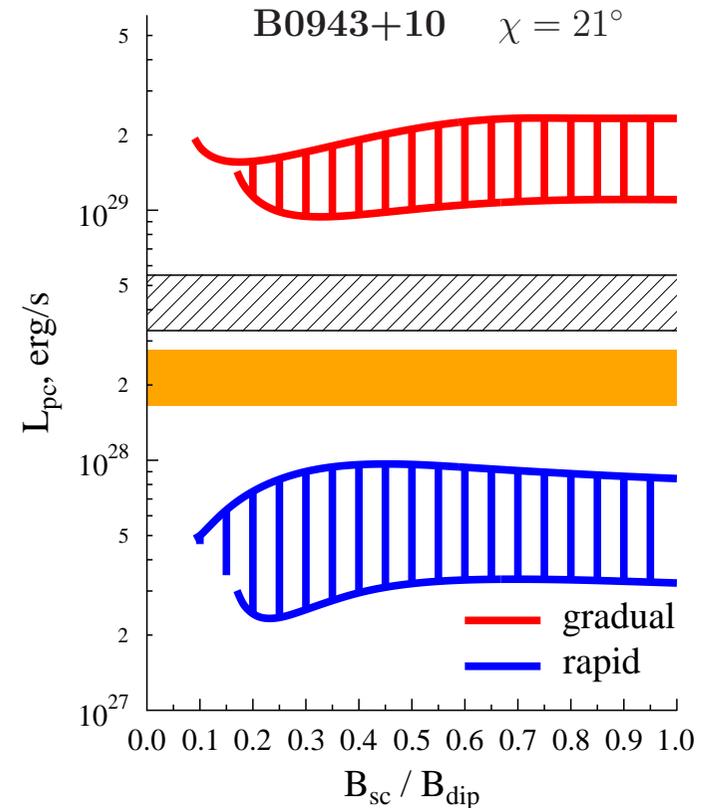
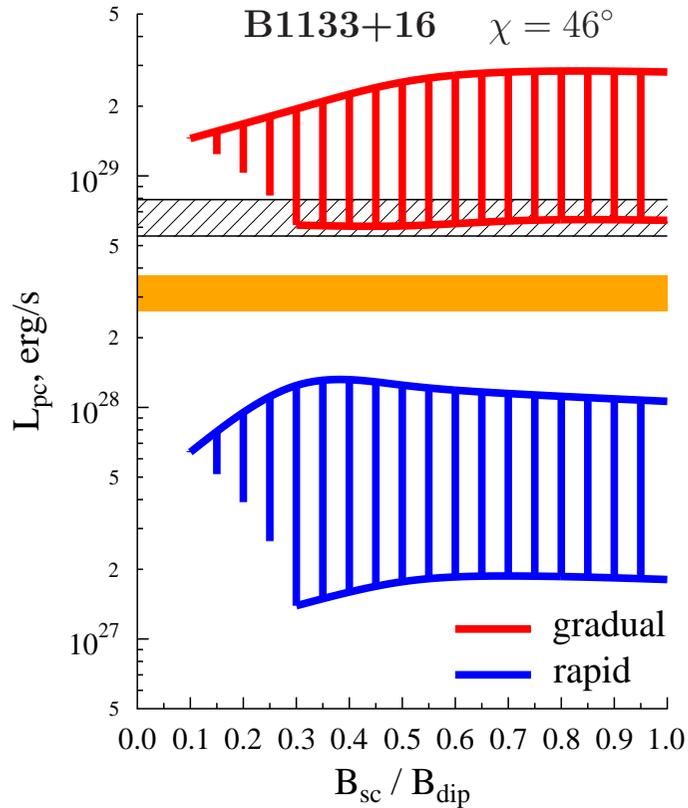
$B_{dip} = 1.0 \cdot 10^{12}$ Гс, $P = 0.23$ с,
 $\tau = 3 \cdot 10^6$ лет, $\dot{E} = 3.9 \cdot 10^{33}$ эрг/с [7],
 $\chi = 45^\circ$ ($\beta_2, C < 0$ из [12])

L_{pc} взятая из [13] показана оранжевым цветом. L_{pc} взятая из [11] обозначена заштрихованной черным областью.

$B_{dip} = 4.9 \cdot 10^{11}$ Гс, $P = 0.25$ с,
 $\tau = 17.5 \cdot 10^6$ лет, $\dot{E} = 5.6 \cdot 10^{32}$ эрг/с [7] ,
 $\chi = 30^\circ$ [10]

Светимости L_{pc} из [10] показаны оранжевой областью и черными линиями. Верхние пределы из [14] показаны зелеными линиями: сплошной – если мы видим одну шапку, штриховой – если мы видим обе шапки.

Светимость полярной шапки



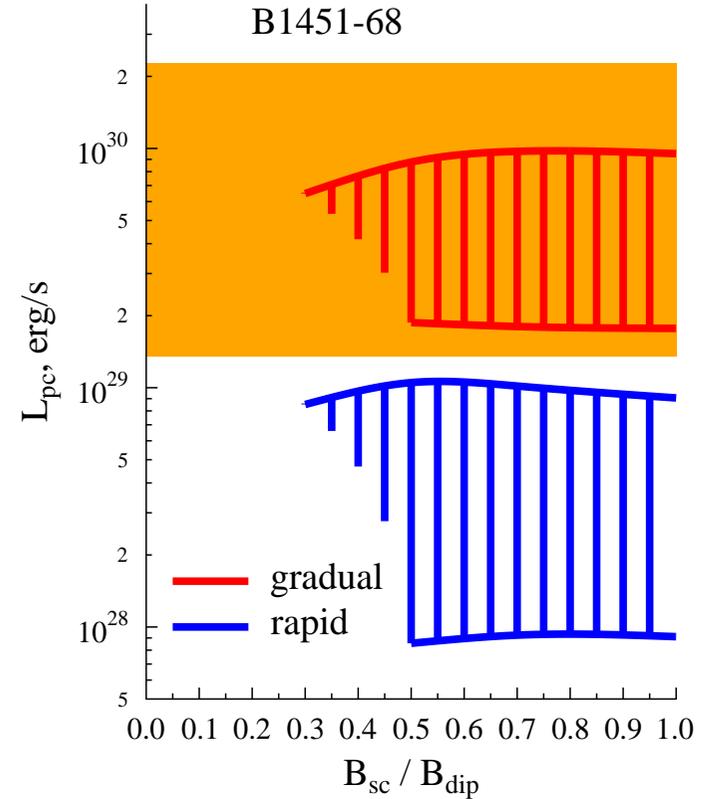
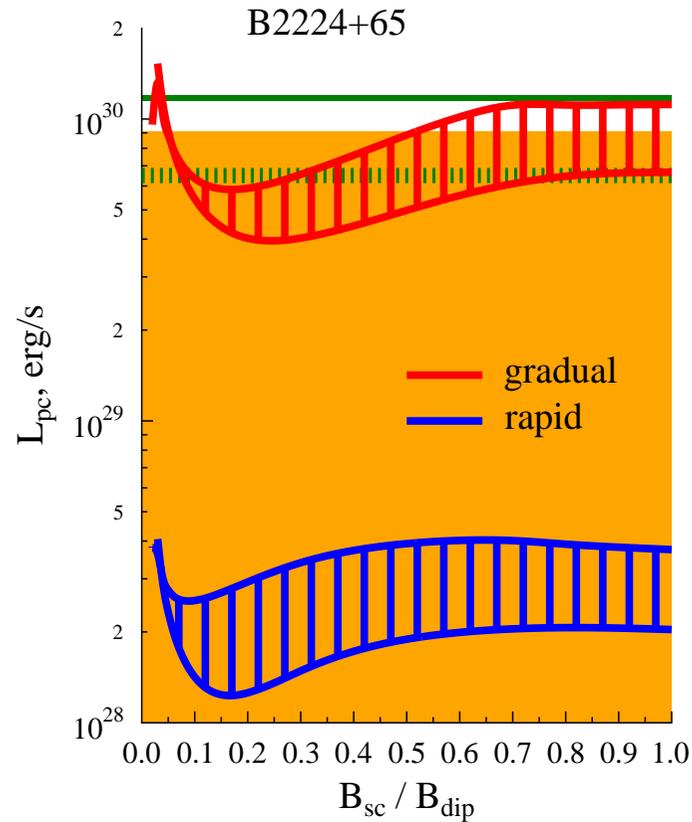
$B_{dip} = 4.26 \cdot 10^{12}$ Гс, $P = 1.188$ с,
 $\tau = 5.04 \cdot 10^6$ лет, $\dot{E} = 8.8 \cdot 10^{31}$ эрг/с [7].
 Угол $\chi = 46^\circ$ взят из [15].

Рентгеновская светимость L_x , взятая из [11] показана заштрихованной полосой, из [16] – желтой полосой.

$B_{dip} = 4.0 \cdot 10^{12}$ Гс, $P = 1.098$ с,
 $\tau = 4.98 \cdot 10^6$ лет $\dot{E} = 10^{32}$ эрг/с [7].

Угол $\chi = 21^\circ$ взят из [6]. Рентгеновская светимость L_x , взятая из [17] заштрихованной полосой, $0.5 L_x$ – желтой полосой.

Светимость полярной шапки

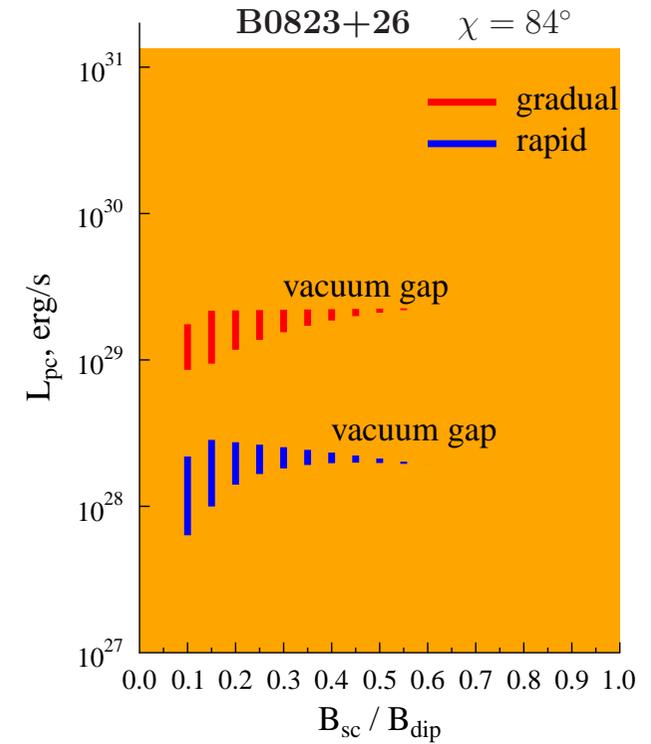
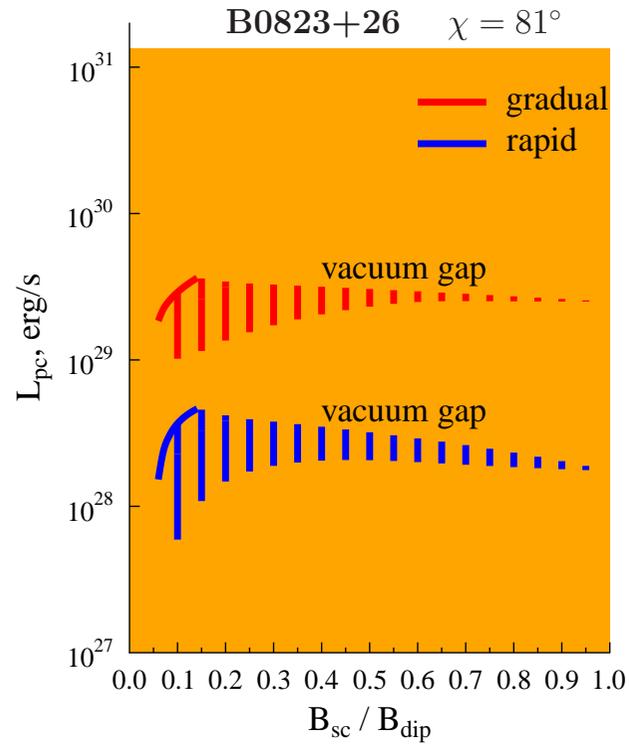
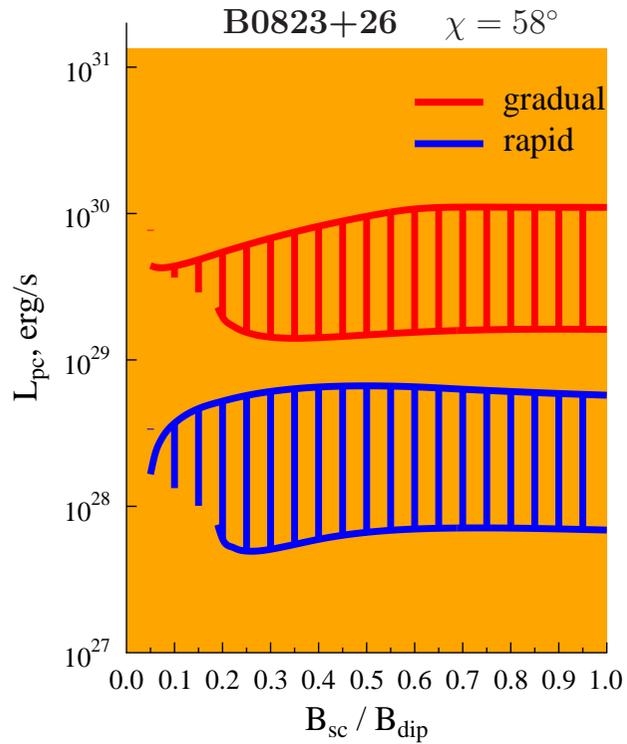


$B_{dip} = 5.2 \cdot 10^{12} \text{ Гс}, P = 0.68 \text{ с},$
 $\tau = 1.1 \cdot 10^6 \text{ лет}, \dot{E} = 1.2 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с [7]},$
 $\chi = 16^\circ \text{ [15]}$

Светимость L_{pc} из [19] показана сплошной зеленой линией. Верхний предел из [18] показан зеленой штриховой линией, а из [10] – оранжевым цветом.

$B_{dip} = 3.2 \cdot 10^{11} \text{ Гс}, P = 0.26 \text{ с},$
 $\tau = 42.5 \cdot 10^6 \text{ лет}, \dot{E} = 2.1 \cdot 10^{32} \text{ эрг/с [7]},$
 $\chi = 50^\circ (\beta_2, C < 0 \text{ из [12]})$
 L_{pc} из [20] показана оранжевым цветом.

Светимость полярной шапки B0823+26



$B_{dip} = 1.9 \cdot 10^{12}$ Гс, $P = 0.53$ с, $\tau = 4.9 \cdot 10^6$ лет, $\dot{E} = 4.5 \cdot 10^{32}$ эрг/с [7].

Угол наклона $\chi = 58^\circ$ взят из [6], $\chi = 81^\circ$ – из [21], $\chi = 84^\circ$ – из [15].

Желтой полосой показан верхний предел на L_x из работы [10].

Нагрев полярной шапки пульсара B0525+21

Доля пар P_b рождающихся в связанном состоянии
аппроксимировалась как

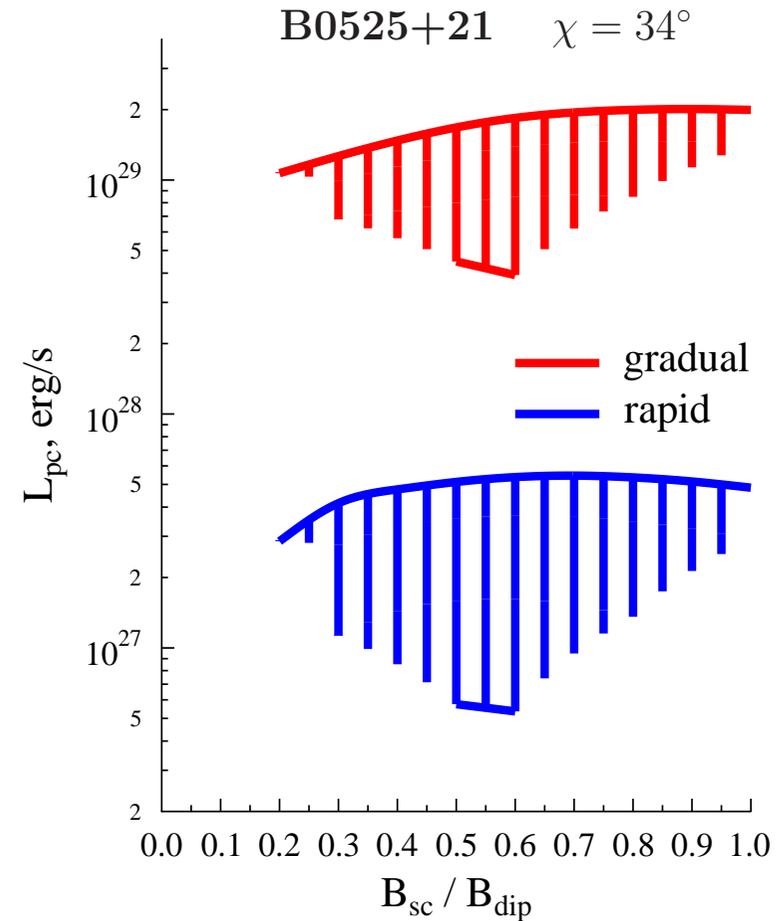
1. $P_b = 0$ при $B < B_{low}$
(позитроны не рождаются)
2. $P_b = (B - B_{low}) / (B_{high} - B_{low})$
при $B_{low} \leq B \leq B_{high}$
3. $P_b = 1$ при $B > B_{high}$
(все пары рождаются связанными)

где $B_{low} = 0.04 B_{cr}$ и $B_{high} = 0.15 B_{cr}$ [22]

Темп фотоионизации пар считался равным [22]

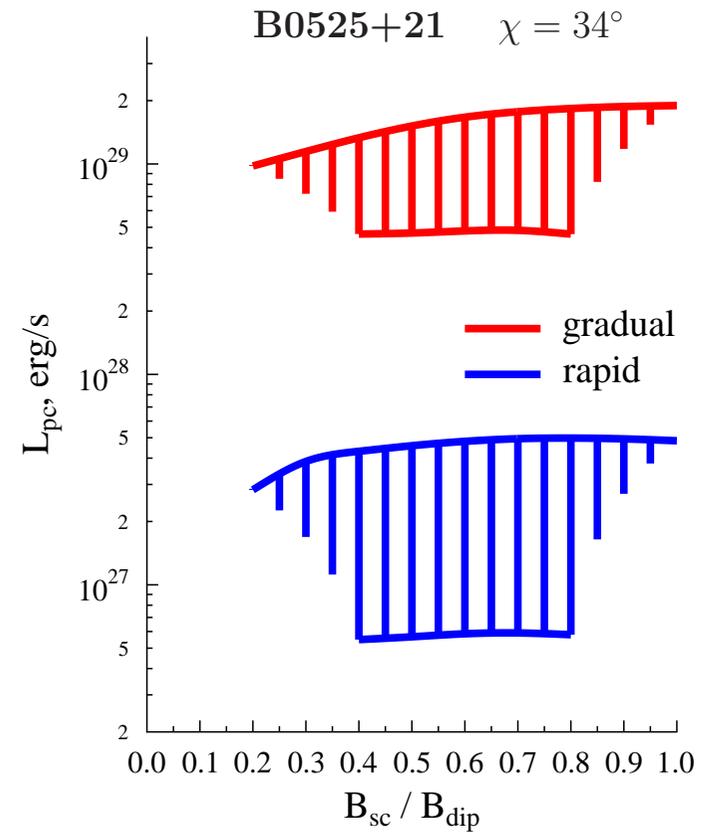
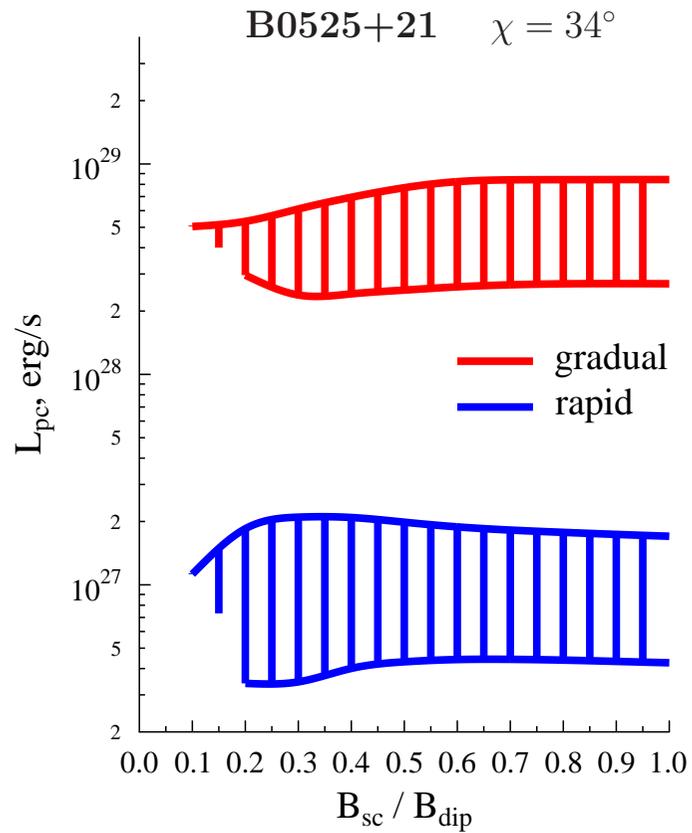
$$\frac{dN}{dt} = W_0 \left(\frac{10^2}{\Gamma} \right)^3 \left(\frac{T}{10^6 K} \right)^2 (1 - \cos \theta_{cap})$$

где Γ – лоренц-фактор позитрония, T – температура полярной шапки, θ_{cap} – угол, под которым видна полярная шапка, $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$.



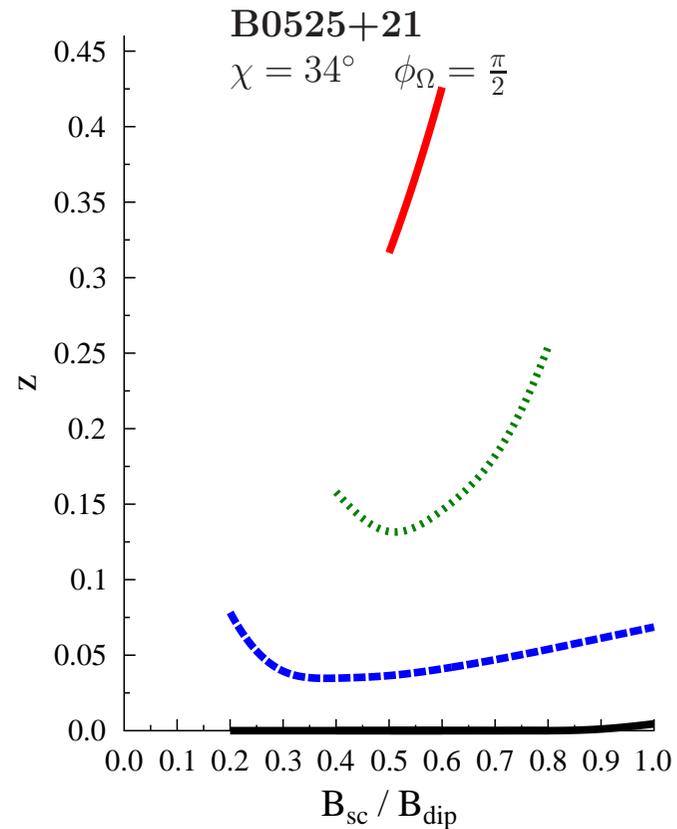
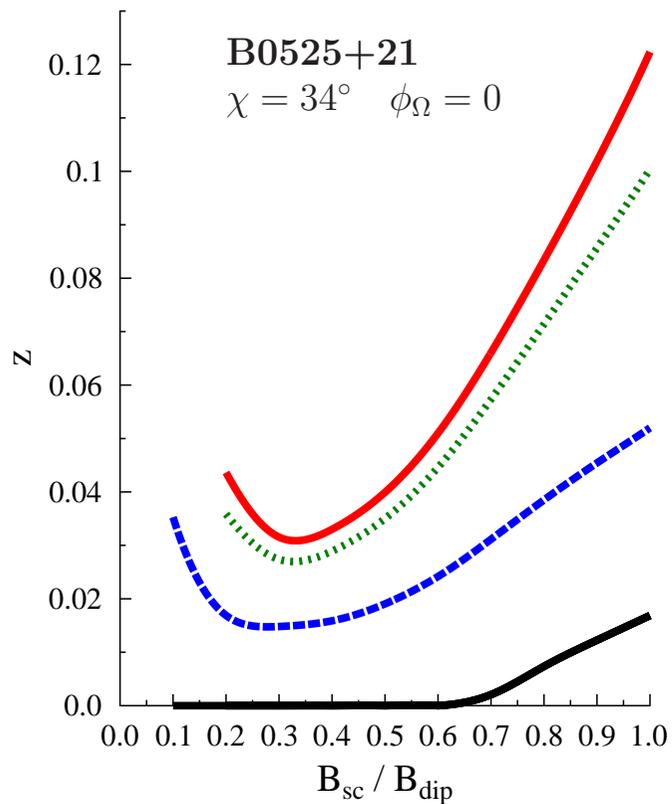
$B_{dip} = 2.5 \cdot 10^{13} \text{ Гс}$, $P = 3.74 \text{ с}$,
 $\tau = 1.5 \cdot 10^6 \text{ лет}$, $\dot{E} = 3 \cdot 10^{31} \text{ эрг/с}$ [7],
 $\chi = 34^\circ$ [6], $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$.

Нагрев полярной шапки B0525+21



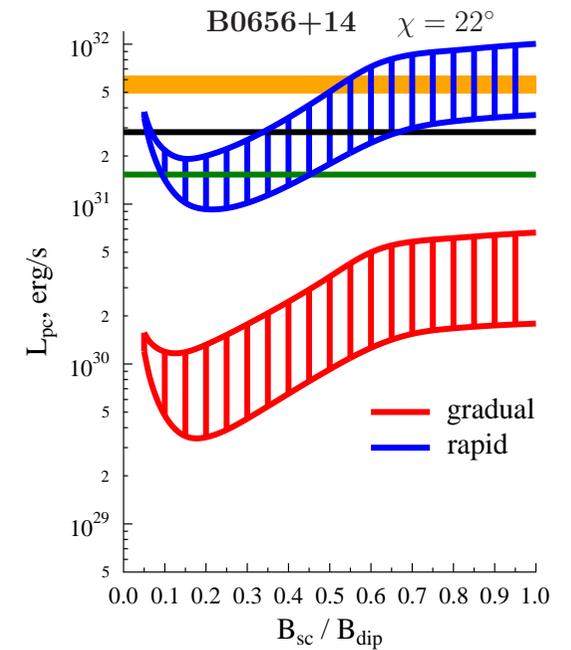
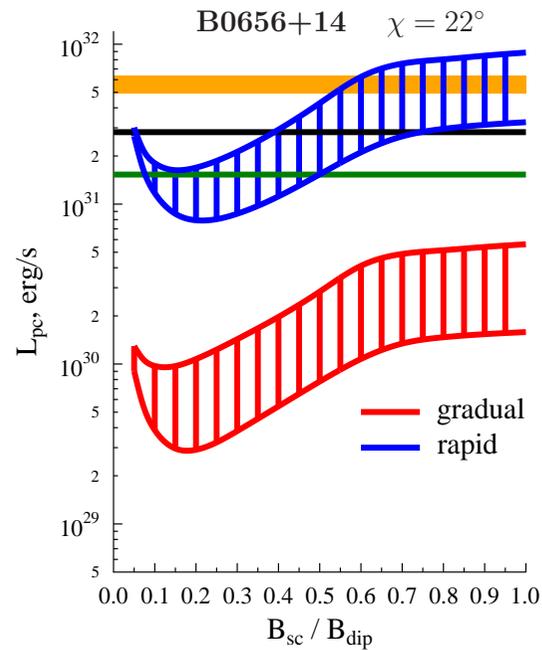
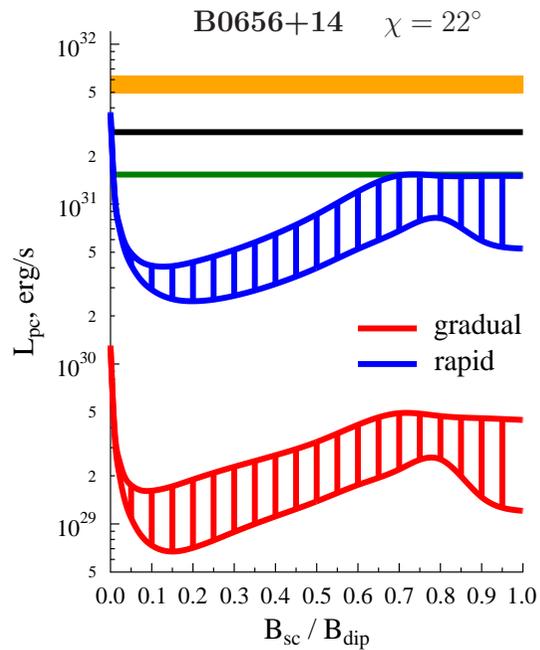
без учета образования позитрониев

$$W_0 = 1.2 \cdot 10^6 \text{сек}^{-1}.$$

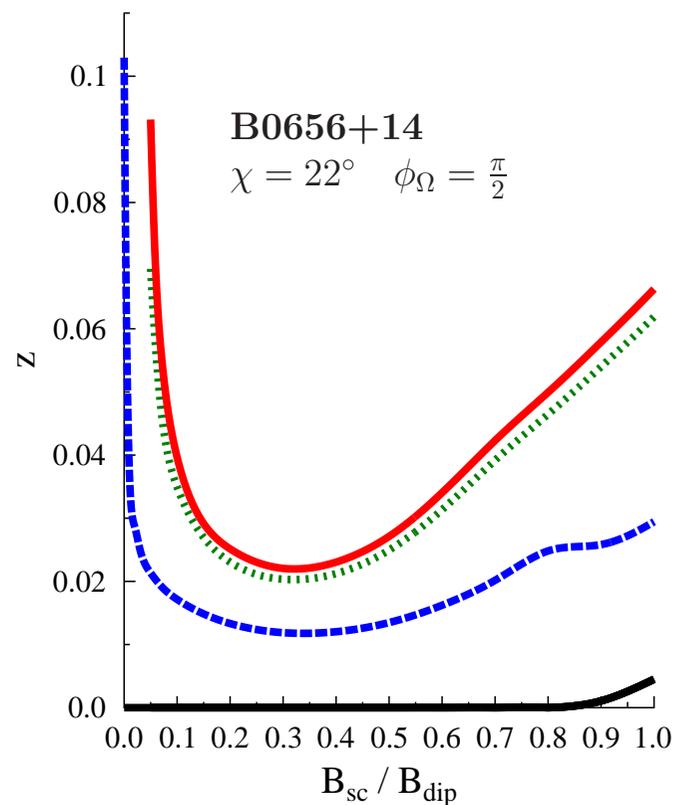
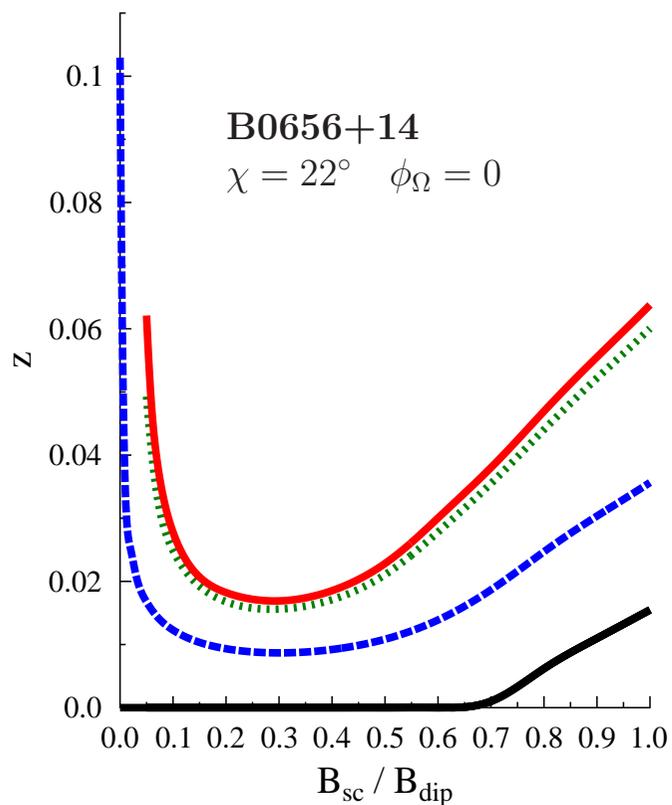


На левом рисунке показаны высоты обкладок диода при $\phi_\Omega = 0$, на правом – при $\phi_\Omega = \frac{\pi}{2}$. Черной кривой показана высота нижней обкладки диода. Синей кривой показана высота верхней обкладки диода без учета образования позитрониев, зеленой – в случае $W_0 = 1.2 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ и красной – в случае $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$.

Светимость полярной шапки B0656+14

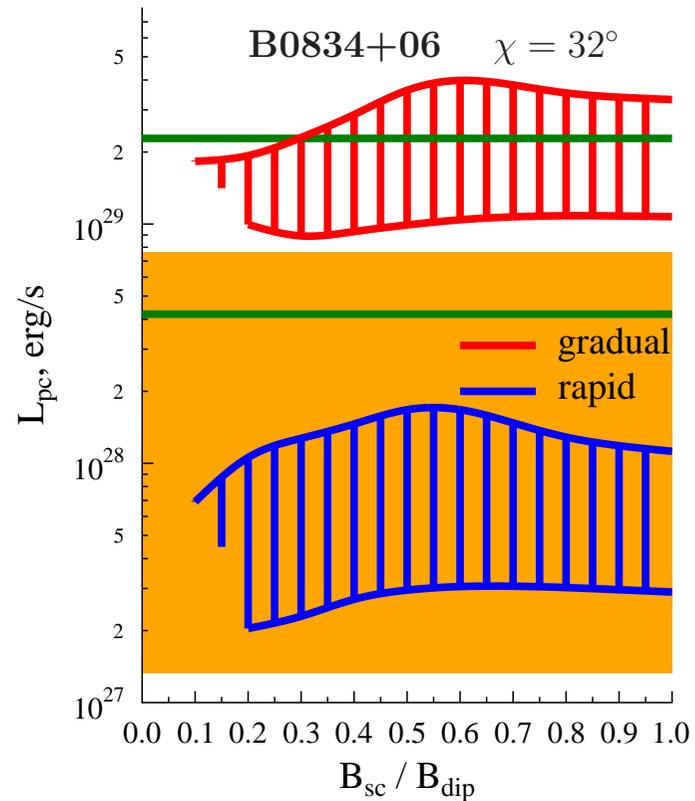
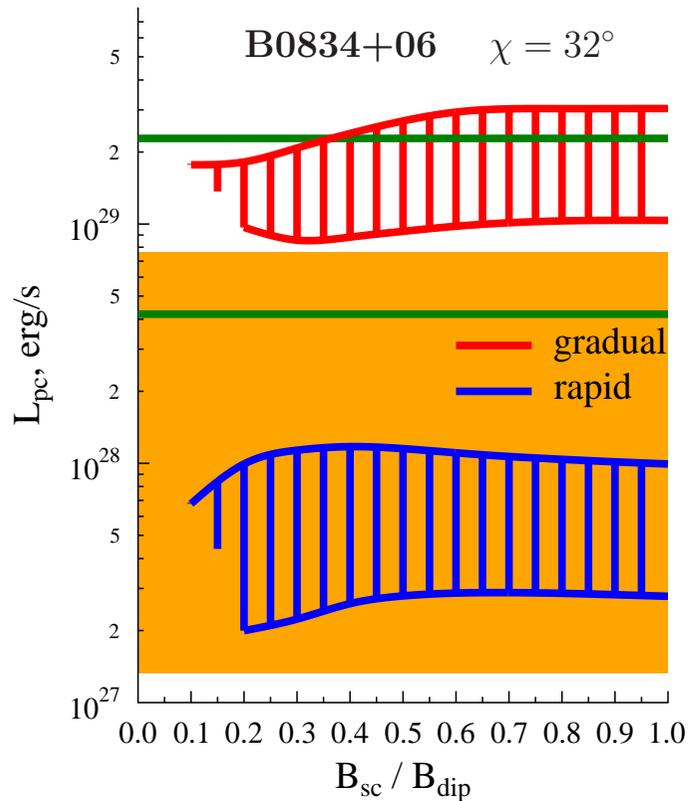


$B_{dip} = 9.3 \cdot 10^{12}$ Гс, $P = 0.385$ с $\tau = 1.1 \cdot 10^5$ лет, $\chi = 22^\circ$ [12], $\dot{E} = 3.8 \cdot 10^{34}$ эрг/с [7]. Желтой полосой показана L_{pc} из [11], L_{pc} из [23] показана черной линией, L_{pc} из [24] показана зеленой линией. На левом рисунке показан нагрев шапки без учета образования позитрониев, на центральном – для случая $W_0 = 1.2 \cdot 10^6$ сек $^{-1}$, на правом – для случая $W_0 = 6 \cdot 10^5$ сек $^{-1}$.

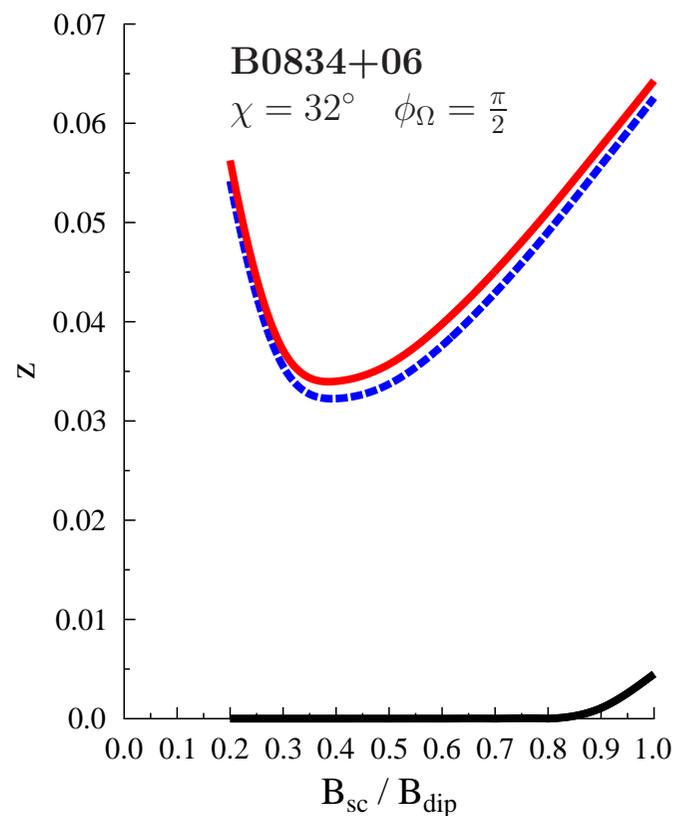
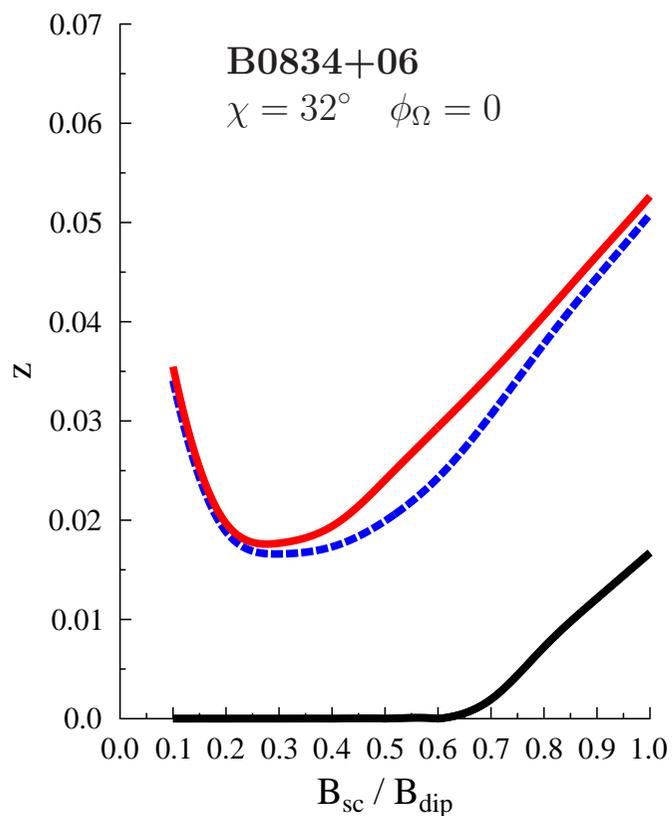


На левом рисунке показаны высоты обкладок диода при $\phi_\Omega = 0$, на правом – при $\phi_\Omega = \frac{\pi}{2}$. Черной кривой показана высота нижней обкладки диода. Синей кривой показана высота верхней обкладки диода без учета образования позитрониев, зеленой – в случае $W_0 = 1.2 \cdot 10^6 \text{сек}^{-1}$, красной – в случае $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$.

Светимость полярной шапки В0834+06



$B_{dip} = 6.0 \cdot 10^{12}$ Гс, $P = 1.27$ с, $\tau = 3.0 \cdot 10^6$ лет, $\dot{E} = 1.3 \cdot 10^{32}$ эрг/с [7]. Угол наклона $\chi = 32^\circ$ (β_1 из [12]). Желтой полосой показана L_{pc} из [23], L_{bol} из [11] показана зелеными линиями. На левом рисунке показан нагрев шапки без учета образования позитрониев, на правом – для случая $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$. Нагрев шапки в случае $W_0 = 1.2 \cdot 10^6 \text{сек}^{-1}$ полностью совпадает с $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$.



На левом рисунке показаны высоты обкладок диода при $\phi_\Omega = 0$, на правом – при $\phi_\Omega = \frac{\pi}{2}$. Черной кривой показана высота нижней обкладки диода. Синей кривой показана высота верхней обкладки диода без учета образования позитрониев, красной – в случае $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$. Высоты для $W_0 = 1.2 \cdot 10^6 \text{сек}^{-1}$ полностью совпадают со случаем $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$.

Результаты

Рассмотрено влияние величины и направления мелкомасштабного магнитного поля на обратный ток позитронов во внутренних зазорах старых радиопульсаров (с характеристическим возрастом $\tau > 10^6$ лет) и связанный с ним нагрев полярных шапок. 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 связанные пары фотоионизируются тепловыми фотонами с полярной шапки. 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. Работа выполнена при частичной поддержке Гранта Президента РФ по поддержке ВНШР (НШ 9297.2016.2).

Список литературы

- [1] Arons J., Fawley W.M., Scharlemann E.T. // ApJ, V.231 p.854 (1979)
- [2] Harding A.K., Muslimov A.G. // ApJ, V.556 p.987 (2001)
- [3] Yu.E. Lyubarskii // A&A V.261 p.544 (1992)
- [4] В.Д.Пальшин, А.И.Цыган "Рентгеновское излучение полярных областей радиопульсаров. Недипольное поле."Препринт Физ.-тех. ин-та им. А.Ф.Иоффе №1718 (С.-Петербург, 1998)
- [5] Е.М.Кантор, А.И.Цыган // Астрон. журн., т.80, с.665 (2003)
- [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] A.Noutsos et al // *ApJ*, V. 728, p.77 (2011)
- [9] W.Becker et al // *ApJ*, V. 615, p.908 (2004)
- [10] V.E. Zavlin, G.G. Pavlov // *ApJ*, V. 616, p. 452 (2004)
- [11] J.Gil et al. // *ApJ*, V. 686, p. 497 (2008)
- [12] И.Ф. Малов, Е.Б.Никитина // *АЖ*, т.88,р.22 (2011)
- [13] Z.Misanovic et al // *ApJ*, V.685, p.1129 (2008)
- [14] W.Becker et al. // *ApJ*, V.615, p.908 (2004)
- [15] J.M. Rankin // *ApJSS*, V. 85, p. 146 (1993)
- [16] O. Kargaltsev, G.G. Pavlov and G.P. Garmire // *Astrophys. J.* V. 636, P.406 (2006)
- [17] B.Zhang, D.Sanwal, G.G.Pavlov // *ApJ*, V.624, L109 (2005)
- [18] C.Y.Hui, W.Becker // *A & A*, V. 467, p.1209 (2007)
- [19] C.Y.Hui et al // *ApJ*, V.747, p.74 (2012)
- [20] B.Posselt et al // *ApJ*, V.749, id 146 (2012)
- [21] J.E. Everett, J.M. Weisberg, *ApJ*, V. 553, p. 341 (2001)
- [22] V.V.Usov, D.B. Melrose // *Australian Journal of Physics*, V.48, p. 571 (1995)
- [23] A.Szary // *arXiv:1304.4203*
- [24] G.Pavlov et al // *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. (2013)