

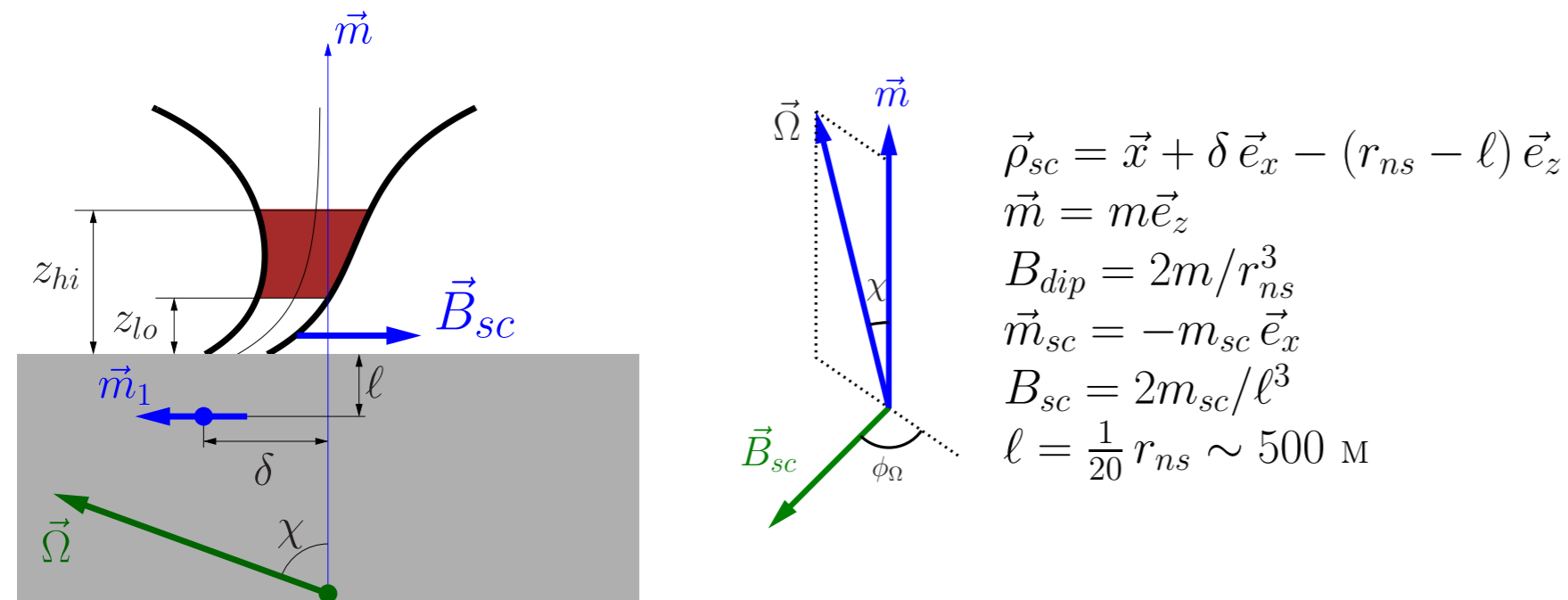
Влияние мелкомасштабного поля и угла наклона на нагрев полярной шапки радиопульсара J0901-4046

Барсуков Д.П.¹, Морозов И.К.¹, Попов А.Н.¹

1 - ФТИ им. А.Ф. Иоффе

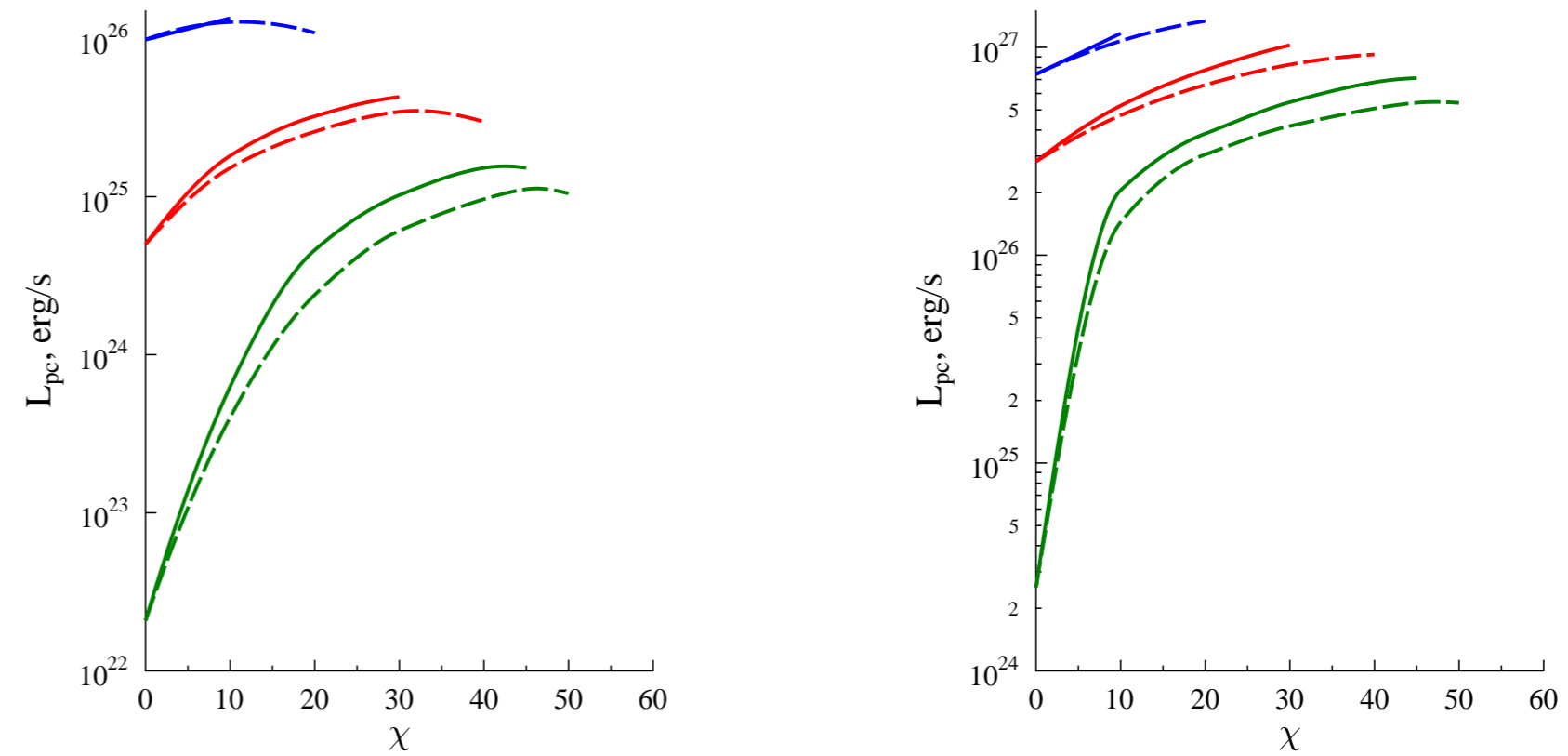
Пульсар J0901-4046 имеет период вращения $P = 75.8$ сек и является наиболее медленно вращающимся среди одиночных радиопульсаров. Мы рассматриваем влияние величины мелкомасштабного магнитного поля и угла наклона пульсара в модели смещенного диполя на обратный ток позитронов во внутреннем зазоре и связанный 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 пары рождаются в связанном состоянии – в виде позитрониев, которые затем фотоионизируются тепловыми фотонами с поверхности звезды. Не учитываются влияние поляризации изгибного излучения, расщепление фотонов и распад позитрониев.

Мелкомасштабное поле



$$\begin{aligned} \vec{\rho}_{sc} &= \vec{x} + \delta \vec{e}_x - (r_{ns} - \ell) \vec{e}_z \\ \vec{m} &= m \vec{e}_z \\ B_{dip} &= 2m/r_{ns}^3 \\ \vec{m}_{sc} &= -m_{sc} \vec{e}_x \\ B_{sc} &= 2m_{sc}/\ell^3 \\ \ell &= \frac{1}{20} r_{ns} \sim 500 \text{ м} \end{aligned}$$

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



Тоже, что на предыдущем рисунке, но для случая $W_0 = 6 \cdot 10^6 \text{сек}^{-1}$, $f = 0.3$

Фотоионизация позитрониев

Доля пар P_b рождающихся в связанном состоянии аппроксимировалась как

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

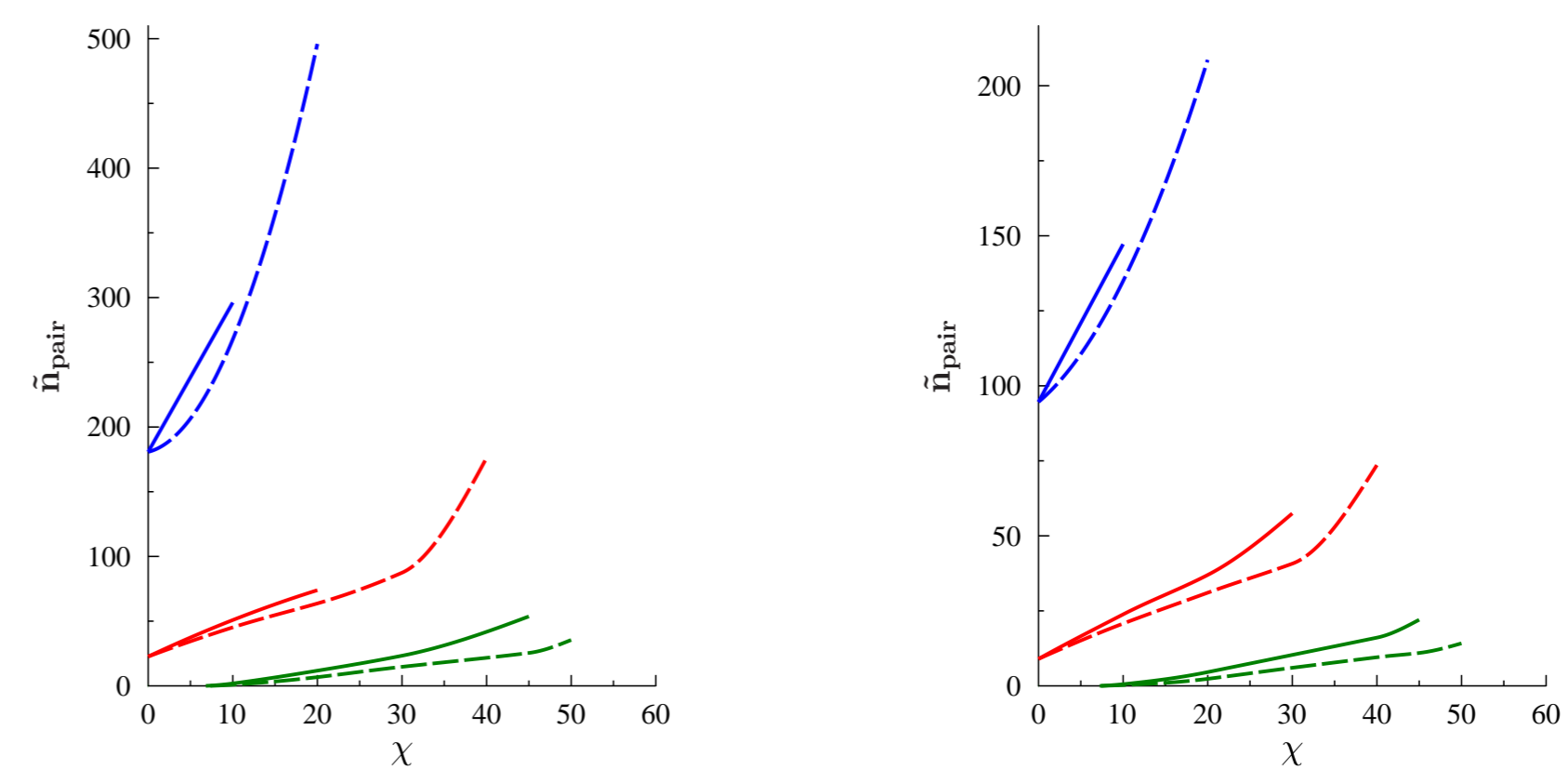
где $B_{low} = 0.04 B_{cr}$ и $B_{high} = 0.15 B_{cr}$ [3]

Темп фотоионизации пар считался равным [3]

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

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

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



Показано количество \tilde{n}_{pair} электрон-позитронных пар, образовавшихся при фотоионизации позитрония, в единицах $\frac{dN}{2\pi r^2}$ для случая $B_{sc} = 0.7 B_{dip}$. Левый график соответствует случаю $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$, $f = 1$, а правый график – случаю $W_0 = 6 \cdot 10^6 \text{сек}^{-1}$, $f = 0.3$.

J0901-4046 [1]

$B_{dip} = 1.3 \cdot 10^{14}$ Гс
 $P = 75.89$ с
 $\dot{P} = 2.25 \cdot 10^{-13}$
 $\tau = 5.3 \cdot 10^6$ лет
 $\dot{E} = 2.0 \cdot 10^{28}$ эрг/с
 $D = 328$ пк или 467 пк
 $W_{50} = 295 - 300$ мс
 $\beta \lesssim 0.2^\circ$

предположим, что

- $\Delta = 0.05$
- только изгибное излучение первичных электронов
- фотоионизация позитрониев только фотонами с поверхности звезды

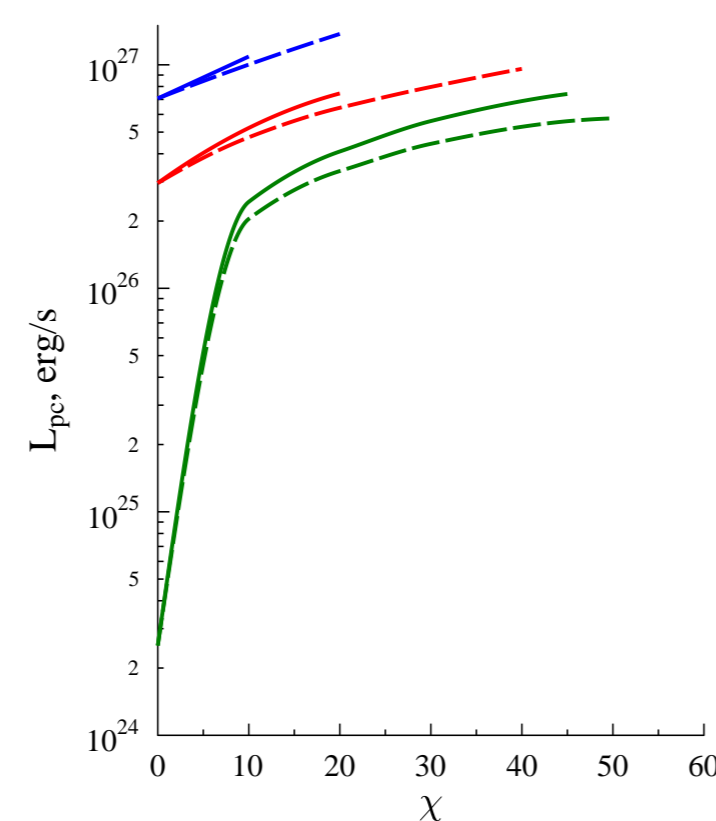
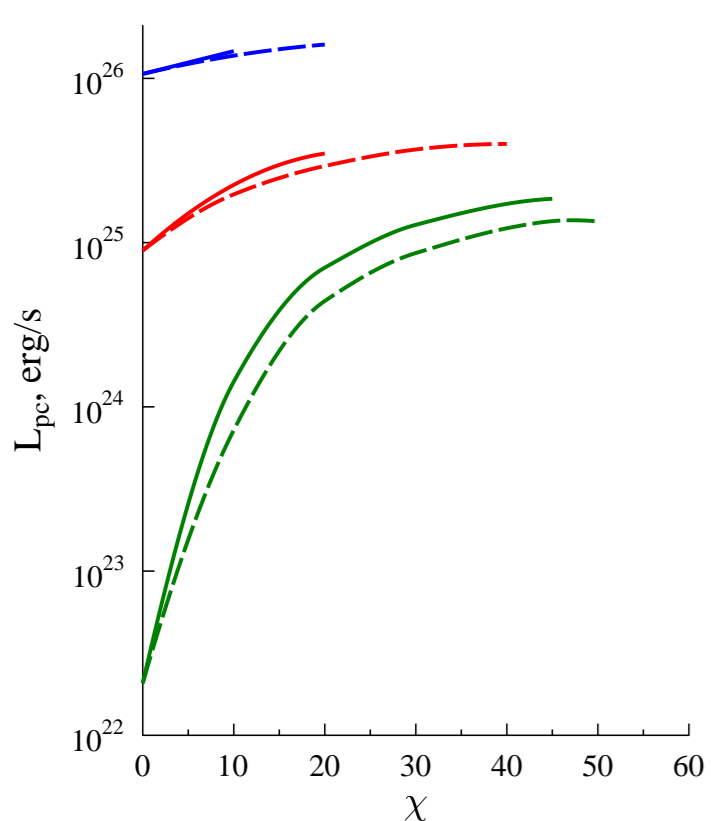
$$T_{surf} = 3 \cdot 10^5 \text{ K}$$

Оценка угла наклона

$$\chi \leq \chi_{max} = \arcsin \left(\frac{\sin \left(\frac{W_{min}}{4} \right)}{\sin \left(\frac{W}{4} \right)} \right) \quad [8]$$

ПОЛОЖИМ
 $W = 2\pi \cdot \frac{W_{50}}{P} \approx 1.4^\circ$

| | | |
|-------------------------|--|------|
| $\chi \approx 43^\circ$ | $W_{min} = 4.6^\circ \cdot (P/1c)^{-0.36}$ | [7] |
| $\chi \approx 50^\circ$ | $\lg(W_{min}/1^\circ) = 0.51 - 0.25 \cdot \lg(P/1c)$ | [9] |
| $\chi \approx 90^\circ$ | $\lg(W_{min}/1^\circ) = 1.12 - 0.25 \cdot \lg(P/1c)$ | [9] |
| $\chi \approx 11^\circ$ | $W_{min} = 2.45^\circ \cdot (P/1c)^{-0.5}$ | [10] |
| $\chi \approx 10^\circ$ | | [2] |



Показана светимость полярной шапки L_{pc} для случая $W_0 = 6 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$, $f = 1$ и $B_{sc} = 0.7 B_{dip}$. Левый график соответствует случаю быстрой экранировки [15] правый график – случаю медленной экранировки [16].

Проблемы

- Мелкомасштабное поле с $\ell \sim 50$ м при возрасте $\tau = 5.3 \cdot 10^6$ лет. Почему до сих пор не распалось ?
- Температура поверхности звезды $T_{surf} \approx 3 \cdot 10^5$ К при $\tau = 5.3 \cdot 10^6$ лет. Почему до сих пор не остыла ?
- Холловский аттрактор [13] ? Молодой пульсар $\tau \sim 10^3 - 10^5$ лет [14] ?
- Расщепление фотонов
- Нестационарные колебания, искры.
- Корректный учет фотоионизации позитрониев.
- Корректный учет аннигиляции позитрониев.
- Определение угла наклона χ

Авторы благодарят Д.Н. Собынина, И.Ф. Малова, Е.Б. Никитину, и В.М. Конторовича за полезную дискуссию и ценные замечания, А.И. Чугунова, А.В. Бирюкова, Ю.А. Шибанова, А.А. Даниленко и В.М. Конторовича за поддержку и ценные замечания.

Литература

- [1] Manisha Caleb et al // Nature Astronomy, V. **6**, p. 828 (2022)
- [2] D.N. Sob'yanin, Phys. Rev. D, **107** (8), id. L081301 (2023).
- [3] V.V.Usov, D.B. Melrose // Australian Journal of Physics, V. **48**, p. 571 (1995)
- [4] H. Herold, H. Ruder, G. Wunner // Phys. Rev. Letters, V. **54**, p. 1452 (1985)
- [5] M.G. Baring, A.K. Harding // ApJ V. **547**, p. 929 (2001)
- [6] 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)
- [7] И.Ф. Малов "Радиопульсары М. Наука 2004
- [8] И.Ф. Малов, Е.Б.Никитина // АЖ, т.88, с.22 (2011)
- [9] И.Ф. Малов, Е.Б.Никитина // АЖ, т.88, с.954 (2011)
- [10] J.M. Rankin // ApJ, V. **352**, p. 247 (1990)
- [11] V.S. Beskin, A.Yu. Istomin // MNRAS, V. **516**, p. 5084 (2022)
- [12] S. Guillot et al // ApJ, V. **874**, p.175 (2019)
- [13] A.P. Igoshev, S.B. Popov // Research Notes of the American Astronomical Society, V. **2**, id 171 (2018)
- [14] M. Ronchi, N. Rea, V. Graber, N. Hurley-Walker, ApJ, **934** (2), id. 184 (2022).
- [15] Arons J., Fawley W.M., Scharlemann E.T. // ApJ, V. **231**, p.854 (1979)
- [16] Harding A.K., Muslimov A.G. // ApJ, V. **556** p.987 (2001)
- [17] Yu.E. Lyubarskii // A&A V. **261** p.544 (1992)
- [18] A.Szary // arXiv:1304.4203
- [19] Е.М.Кантор, А.И.Цыган // Астрон. журн., т.80, с.665 (2003)
- [20] Д.П. Барсуков, О.А. Гоглицидзе, А.И. Цыган // Астрон. журн., т.93, с.569 (2016)