

Эволюция магнитного угла у аккрецирующих нейтронных звезд

arXiv:2105.00754, MNRAS (accepted)

Антон Бирюков (ГАИШ МГУ, К(П)ФУ)
Павел Аболмасов (Университет Турку)

План

- I. Пролог: Магнитные углы нейтронных звёзд
- II. Вращение аккрецирующей НЗ: Модель
- III. Численные результаты (4 частных случая)
- IV. Возможные модификации модели
- V. Выводы

Магнитные углы H3

Магнитный угол

$$N_z = -\frac{\mu^2 \Omega^3}{c^3} \cdot (k_0 + k_1 \sin^2 \chi)$$

$$N_y = -k_2 \frac{\mu^2 \Omega^3}{c^3} \cdot \sin \chi \cos \chi$$

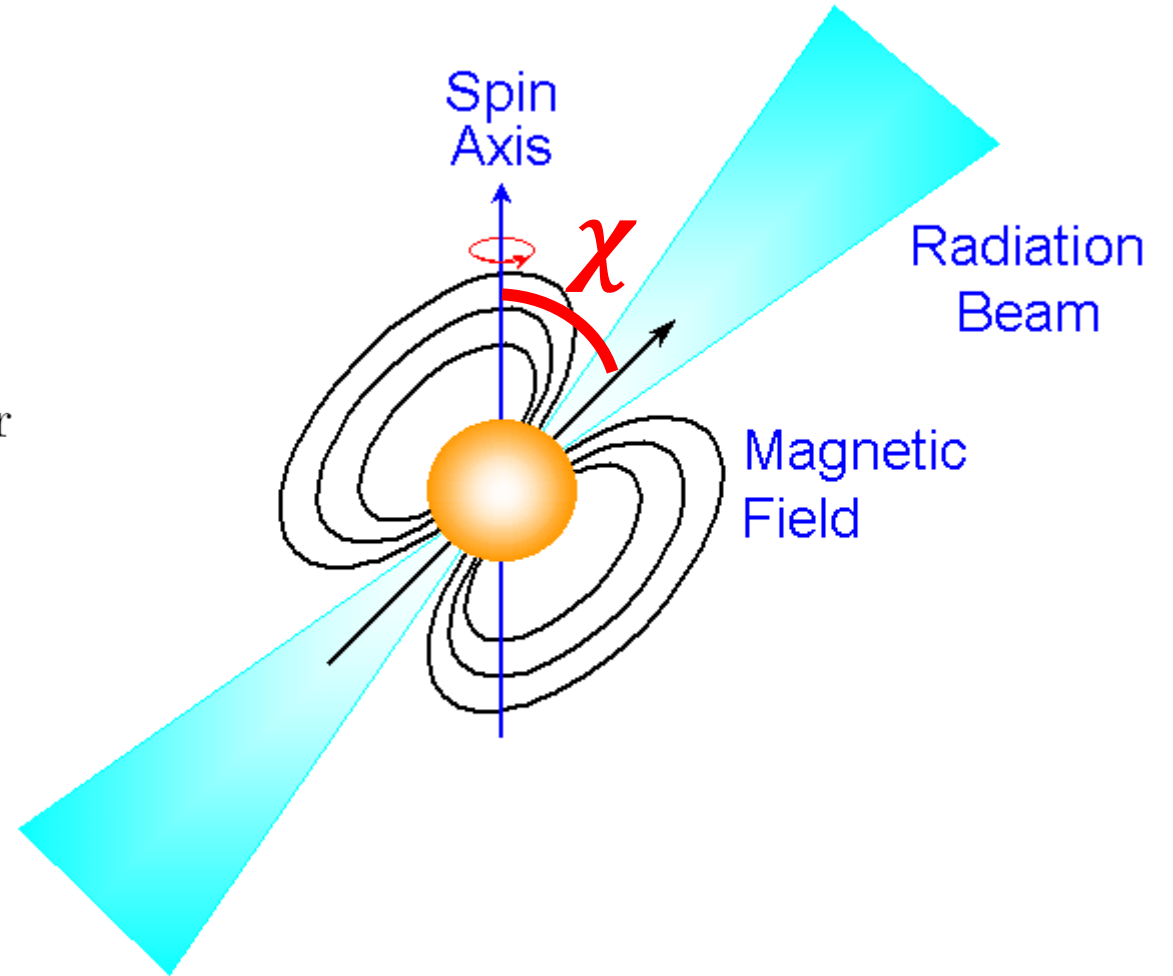
$$\tau_{\text{align}} \sim \tau_{\text{psr}} \sim \frac{c^3 I}{\mu^2 \Omega^2} \simeq 10^8 I_{45} P^2 \mu_{30}^{-2} \text{ yr}$$

(Philippov et al., 1311.1513)

$$N_z = -\frac{\mu^2 \Omega^3}{c^3} \cdot (Q \cdot \cos^2 \chi + \varepsilon P^{-0.5})$$

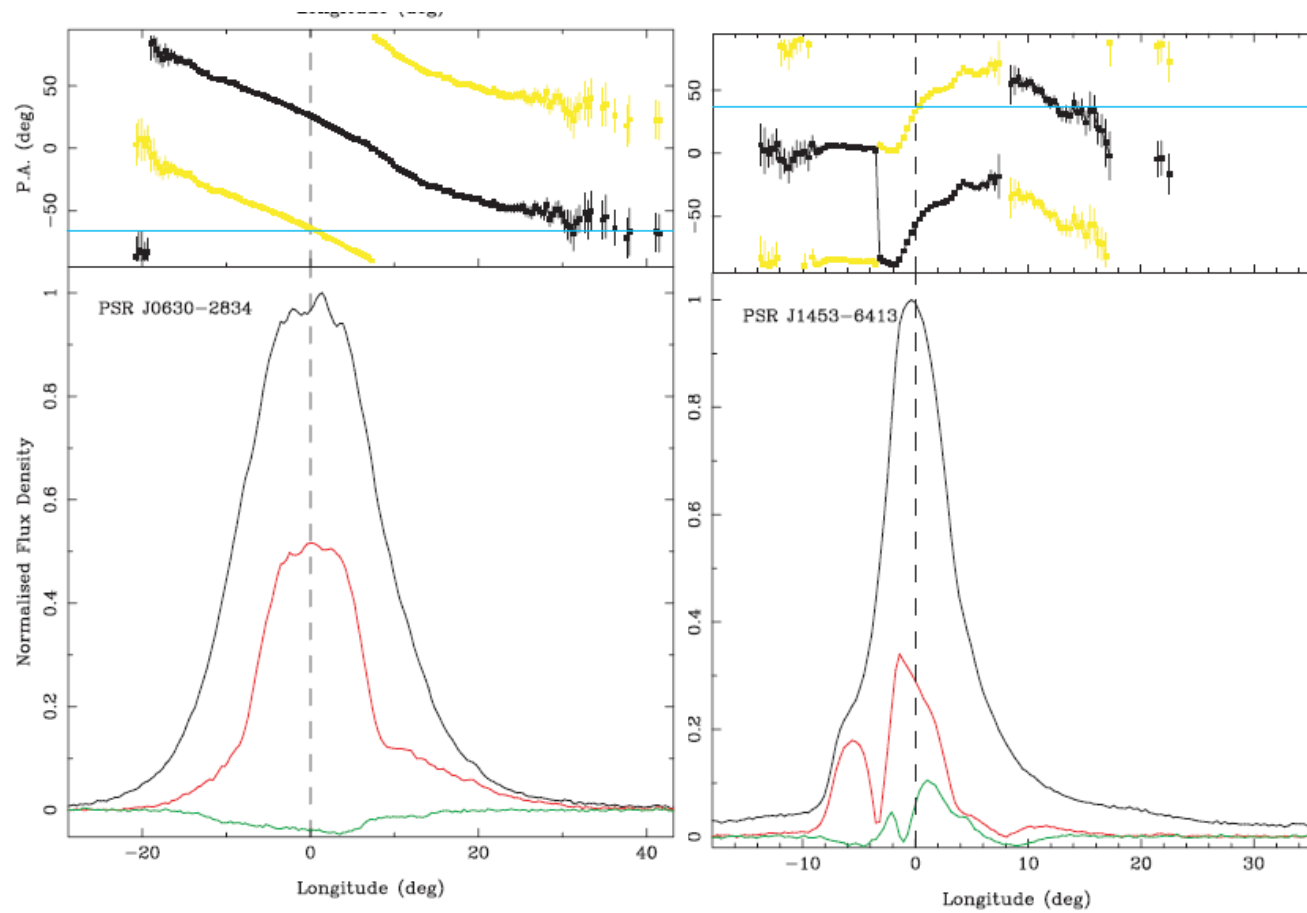
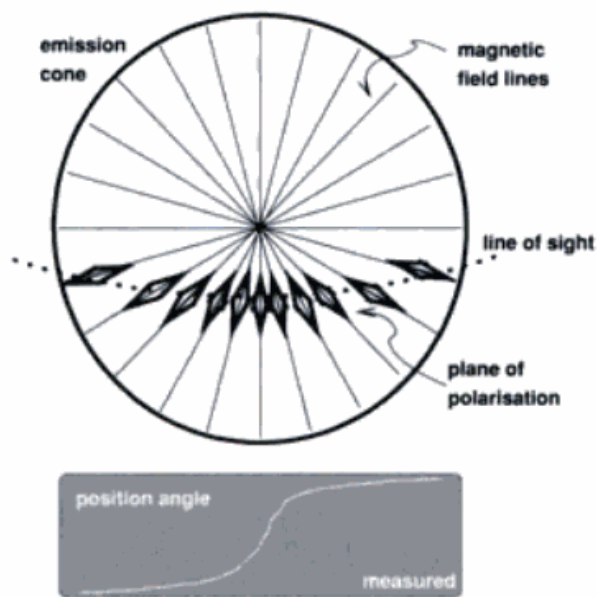
$$N_y = +Q \frac{\mu^2 \Omega^3}{c^3} \cdot \sin \chi \cos \chi$$

Novoselov et al., 2004.03211



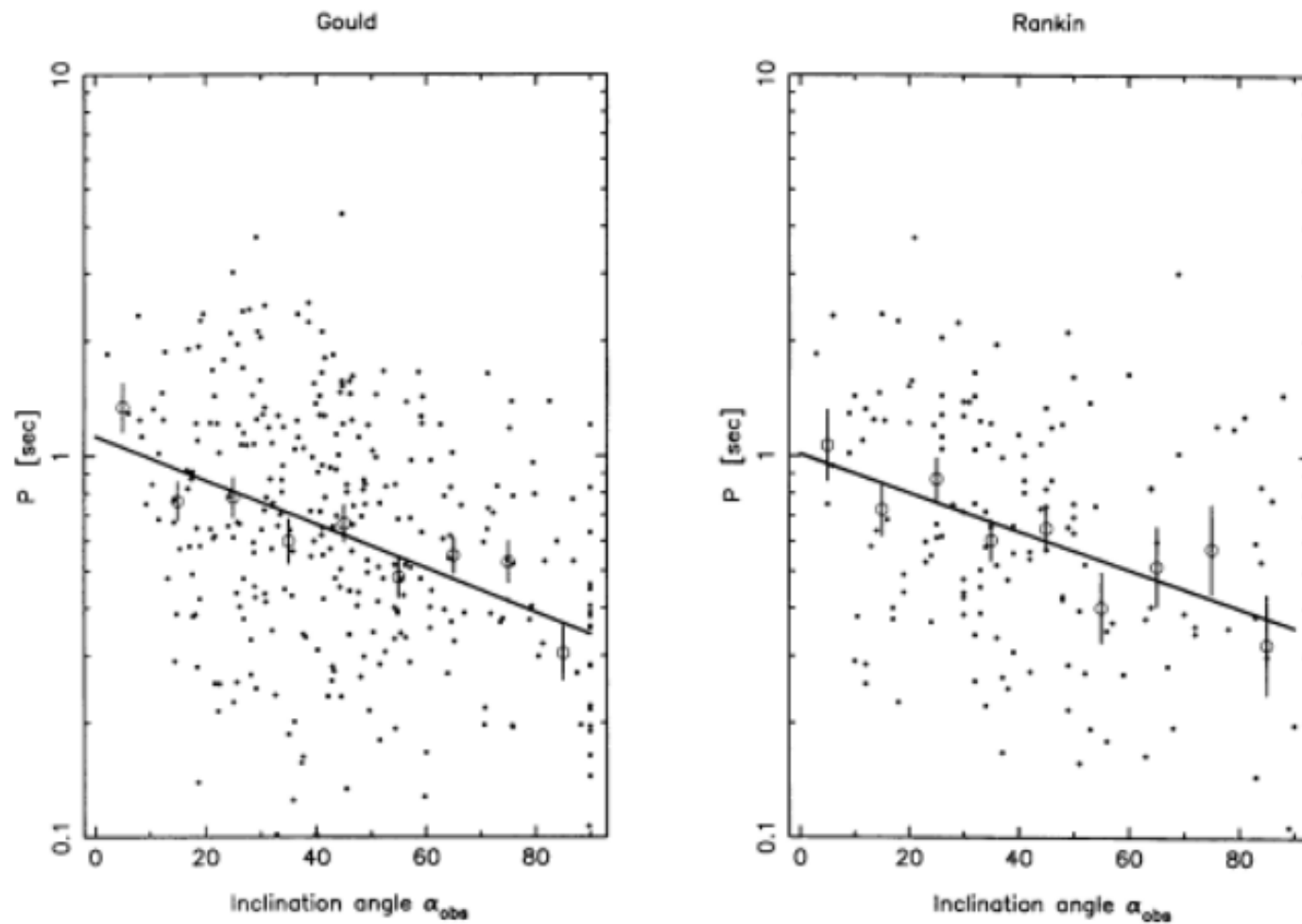
π

Измерение χ



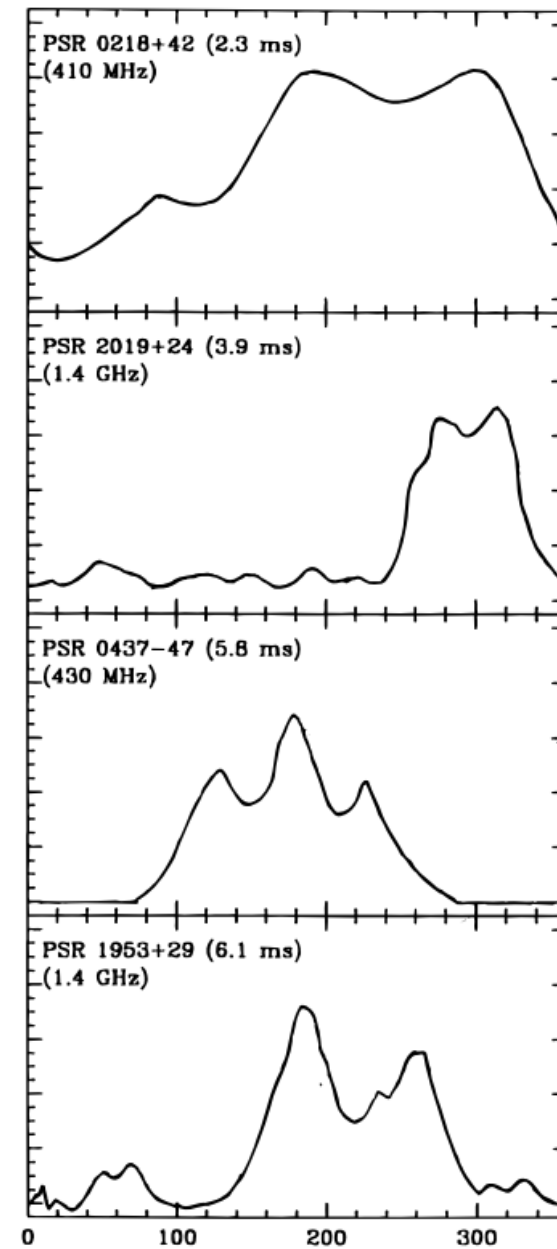
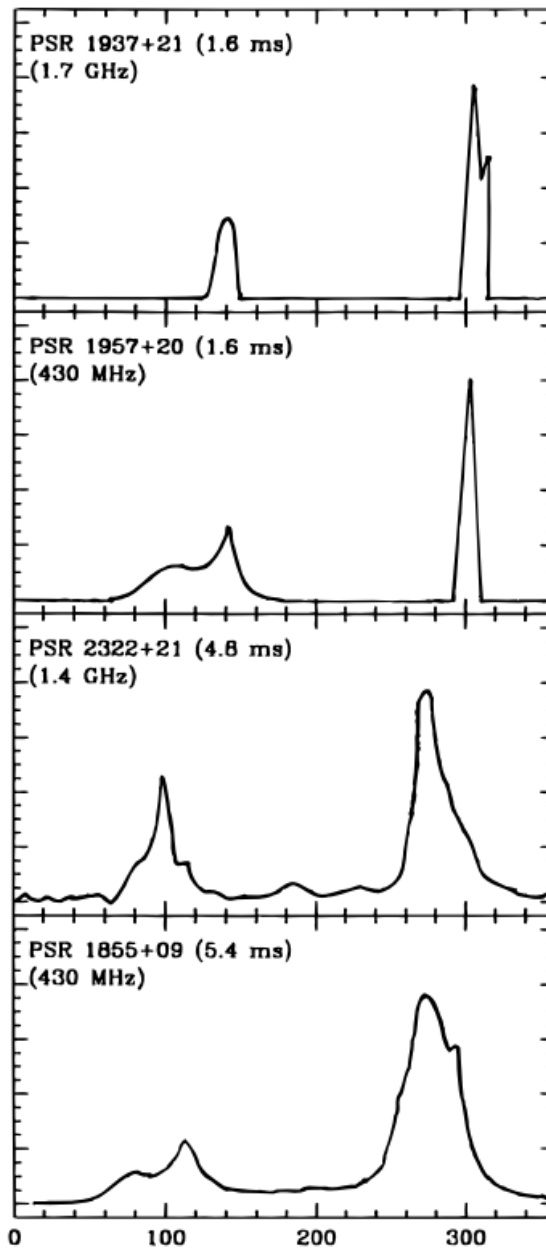
Johnston et al., astro-ph/0510260

Распределение χ

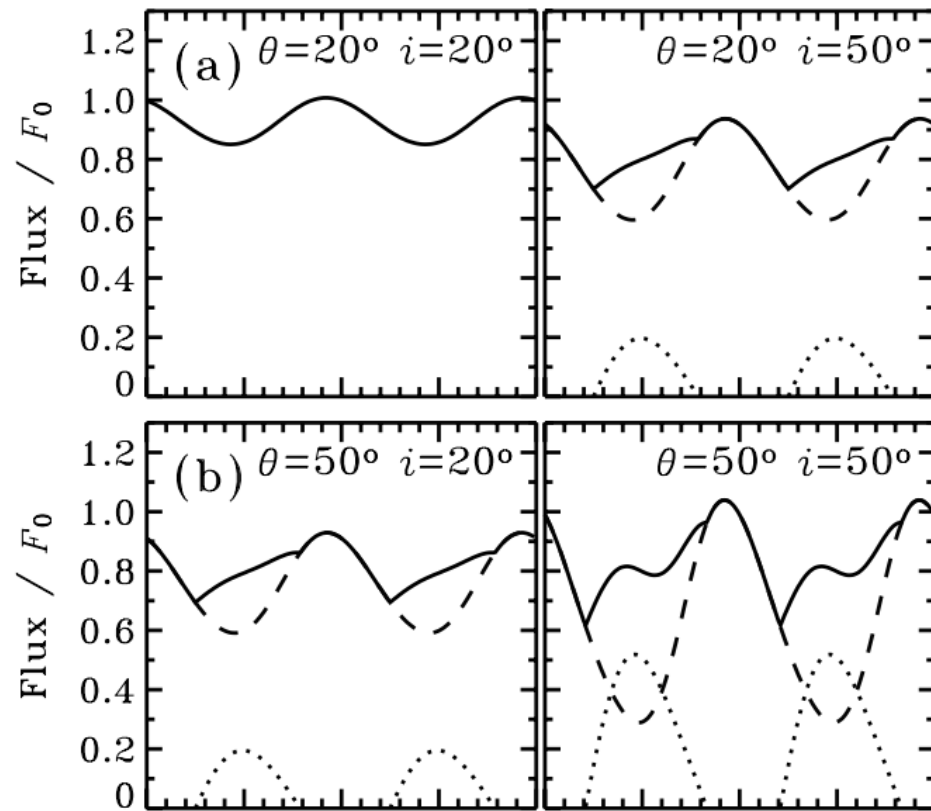


Распределение χ

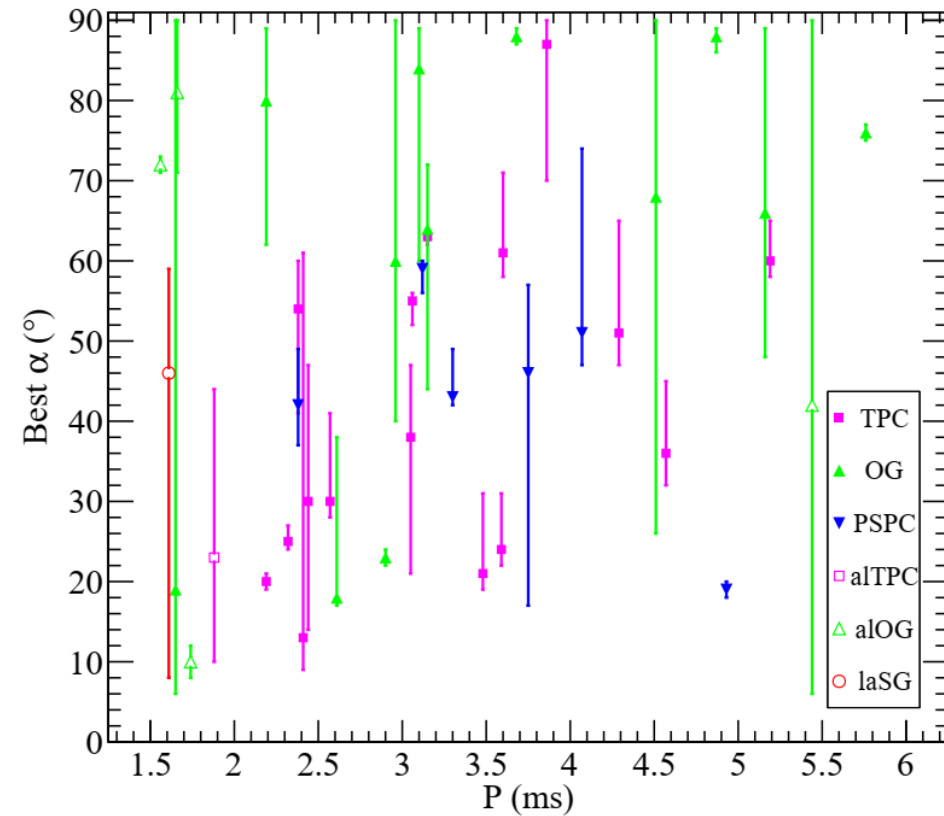
Бимодальное распределение углов миллисекундных пульсаров?



Распределение χ



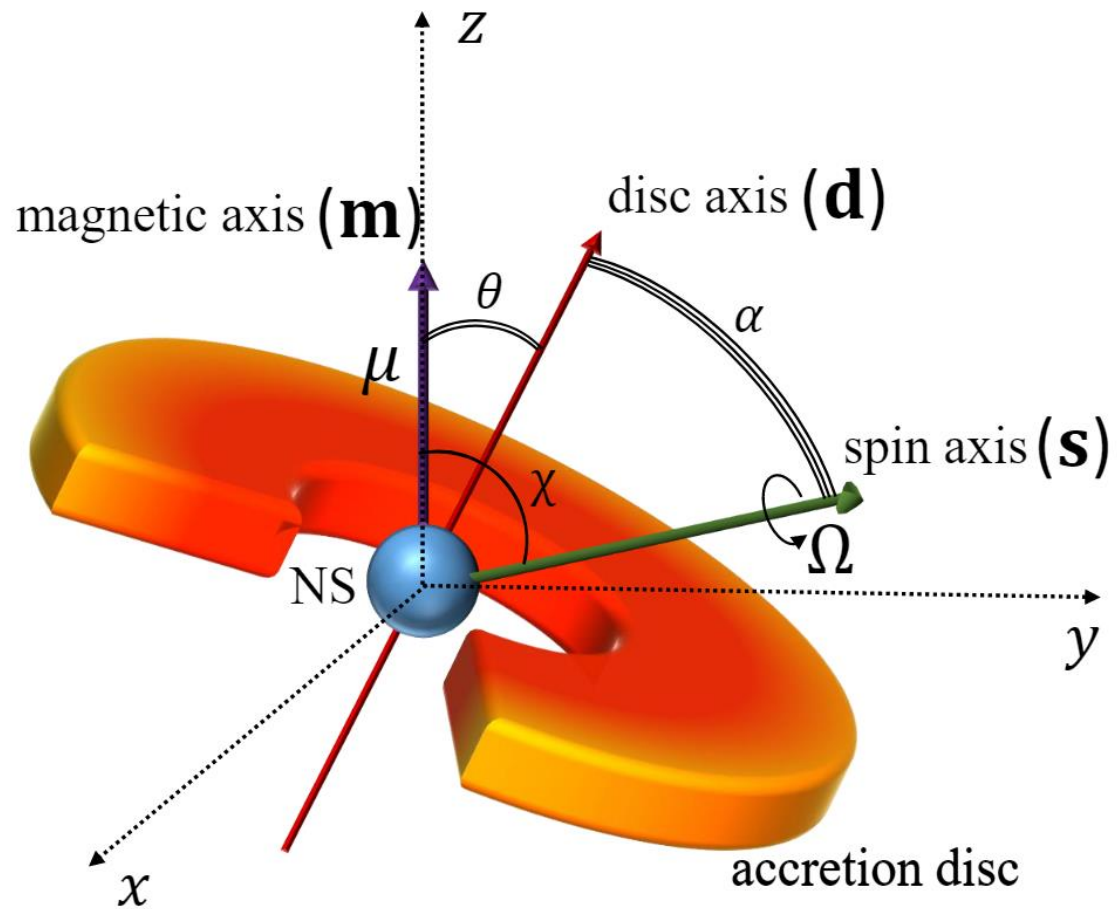
Viironen & Poutanen, astro-ph/0408250



Johnston et al., 1404.2264

Модель

π



- Сферическая НЗ с дипольным магнитным полем.
- Ось вращения не совпадает с осью диска.
- Магнитная ось не совпадает с осью вращения.

$$\mathbf{L}(t) = I(t)\boldsymbol{\Omega}(t) + \epsilon(t)I(t)\Omega_z(t)\mathbf{m}$$

- момент импульса

$$\frac{d\mathbf{L}(t)}{dt} + \boldsymbol{\Omega}(t) \times \mathbf{L}(t) = \mathbf{N}(t)$$

- Уравнения Эйлера

$$\Omega_z = \Omega \cos \chi$$

π

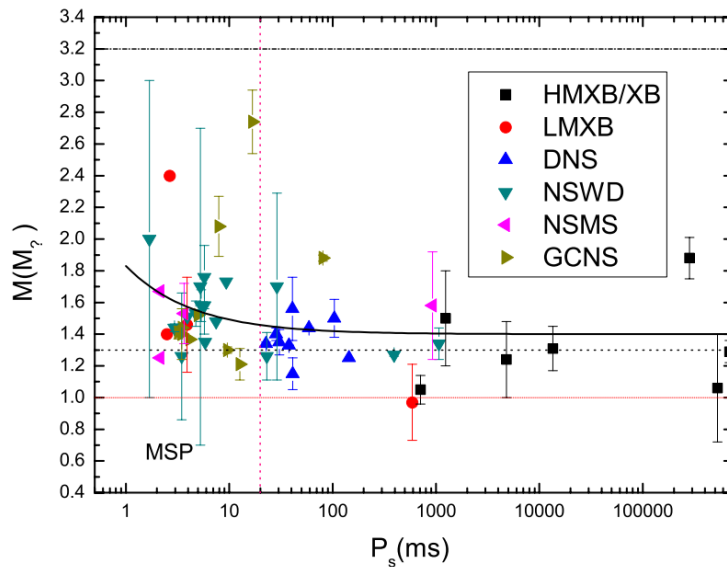
Эволюция в общем виде

$$I \frac{d\Omega}{dt} = N - \frac{dI}{dt} \Omega - \epsilon I \Omega_z \left[\left(\frac{\dot{I}}{I} + \frac{\dot{\Omega}_z}{\Omega_z} + \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon} \right) m + \Omega \times m \right]$$

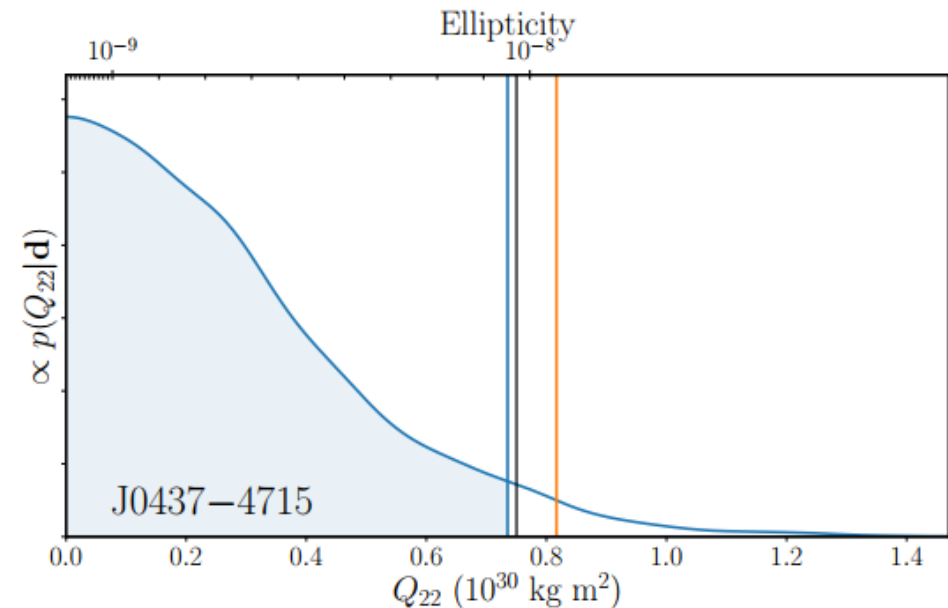
МОМЕНТ ВНЕШНИХ СИЛ

переменная масса

не учитываем



Zhang et al., 1010.5429



LIGO/VIRGO, 2007.14251

Внешний момент: раскрутка

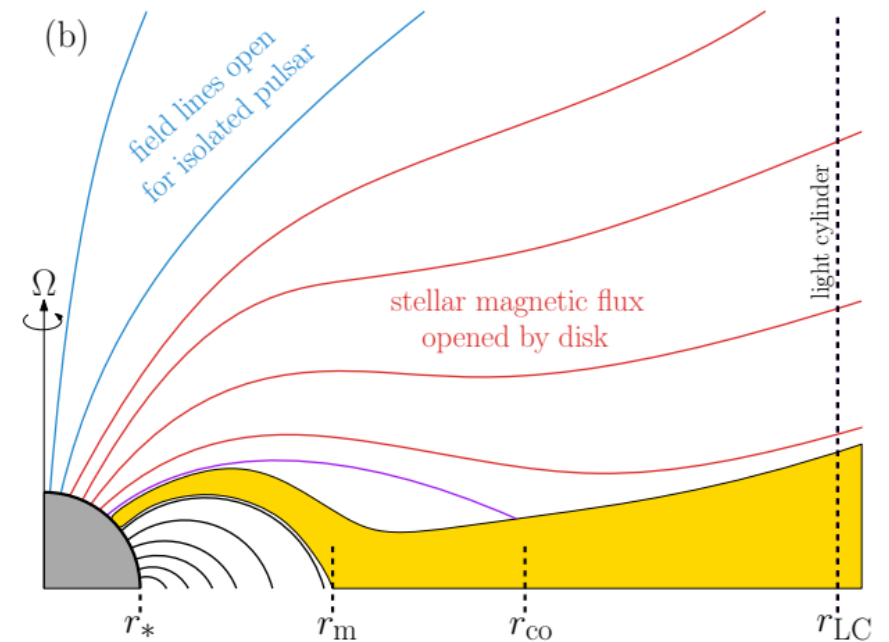
$$N = \underbrace{N_{\text{acc}}}_{\text{red bracket}} + N_{\text{mag}} + N_{\text{psr}}$$

$$N_0 = \dot{M} \sqrt{GM_* r_m}$$

$$r_m = \xi \left(\frac{\mu^4}{2GM_* \dot{M}^2} \right)^{1/7} \quad \text{- радиус магнитосферы}$$

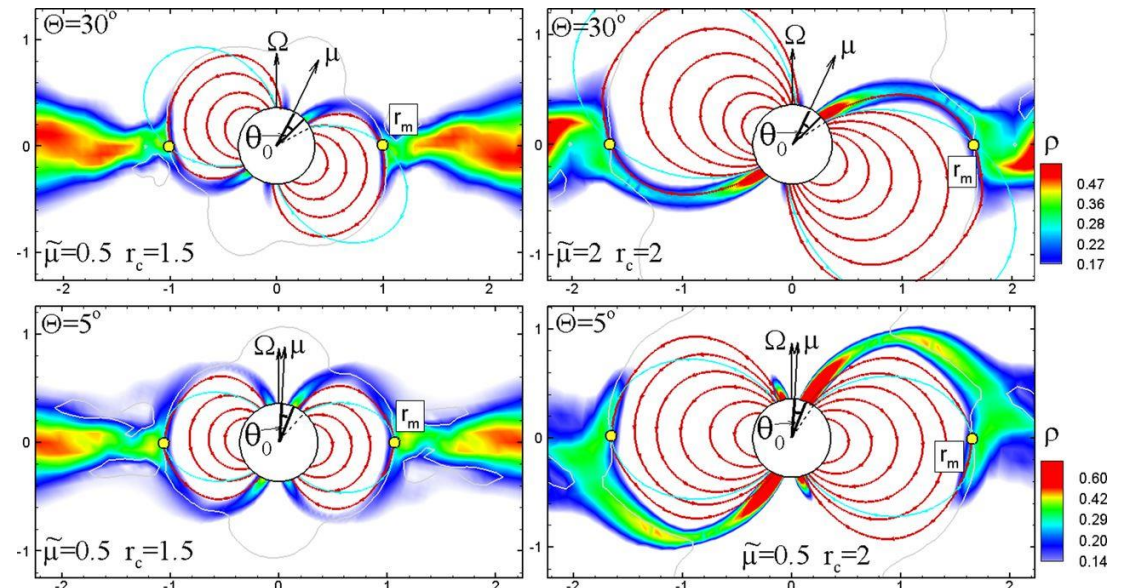
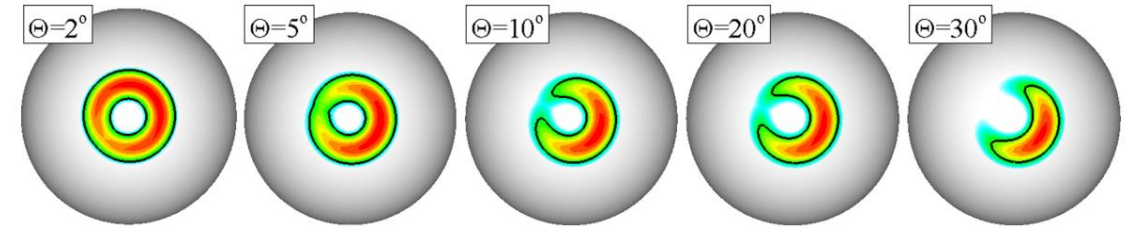
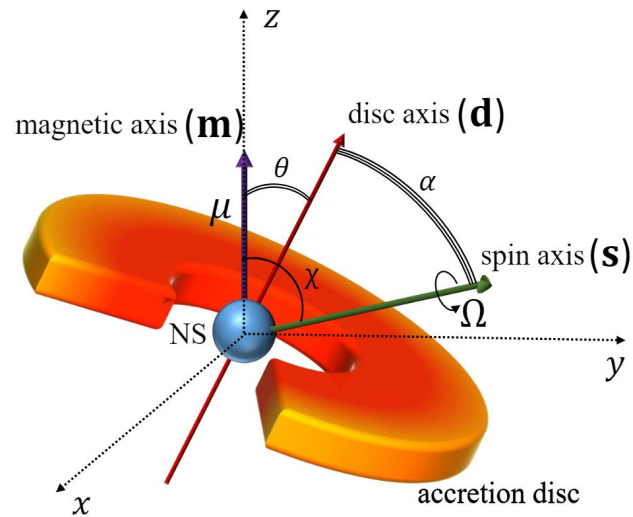
Аккреция включается только когда $r_m < r_{\text{co}}$

$$r_{\text{co}} = (GM_* / \Omega^2)^{1/3} \quad \text{- радиус коротации}$$



Акреция: модуляция момента

$$N_{\text{acc}} = N_0 f(\cos \theta) \mathbf{d}$$



5. In the case of a tilted magnetic axis ($\theta = 20^\circ$), the accretion rate onto the star varies due to the different positions of the magnetospheric axis about the inner disc. **Accretion is more favorable when the magnetosphere is strongly tilted relative to the disc.** The quasi-period of variations is close to the rotational period of the star.

Romanova et al., 2012.10826

Kulkarni & Romanova, 1303.4681

Аккреция: модуляция момента

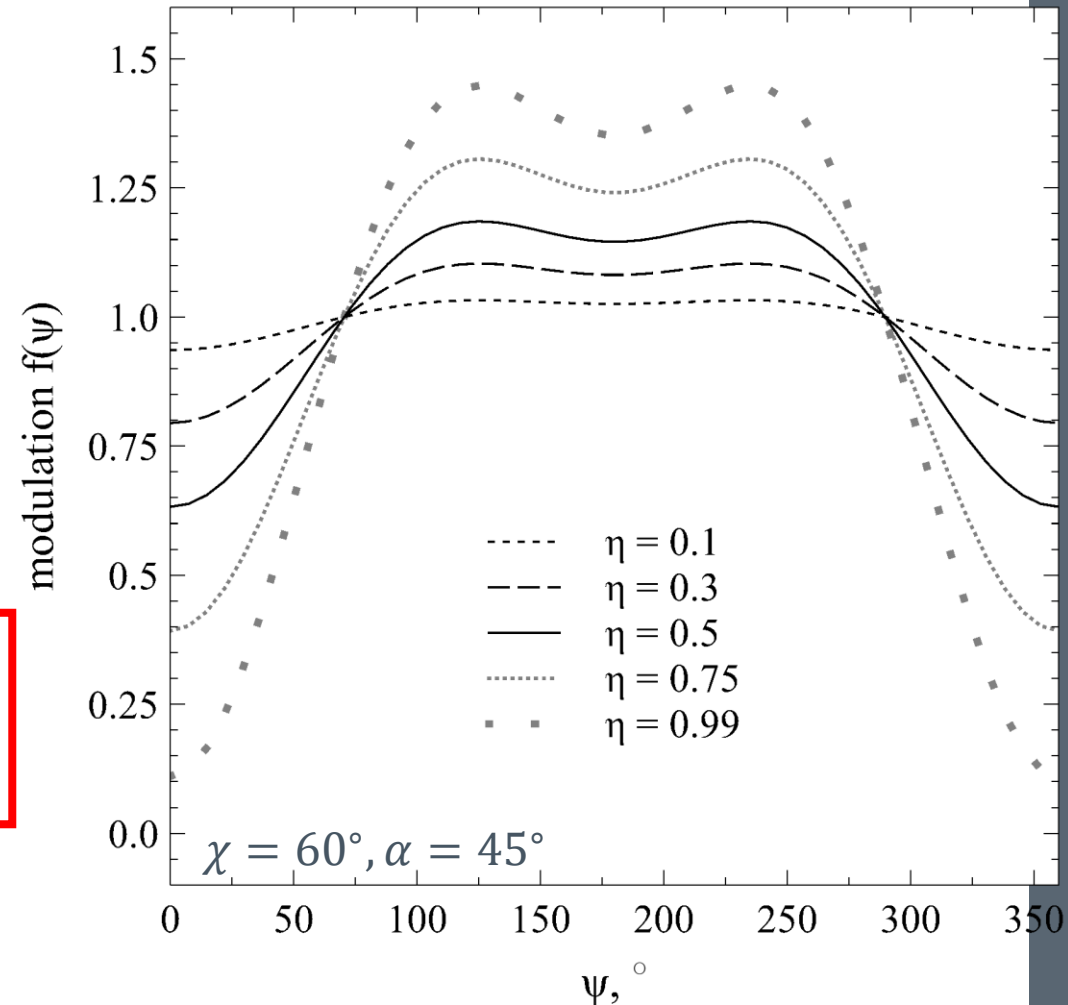
$$\mathbf{N}_{\text{acc}} = N_0 f(\cos \theta) \mathbf{d}$$

$$\cos \theta = \cos \alpha \cos \chi + \sin \alpha \sin \chi \cos \psi$$

$$\psi = - \int \Omega dt$$

$$f(\cos \theta) = A(\eta, \alpha, \chi)(1 - \eta \cos^2 \theta)$$

$$A(\eta, \alpha, \chi) = \left[1 - \frac{\eta}{2} (\sin^2 \chi \sin^2 \alpha + 2 \cos^2 \chi \cos^2 \alpha) \right]^{-1}$$



Внешний момент: торможение

$$\mathbf{N} = \mathbf{N}_{\text{acc}} + \mathbf{N}_{\text{mag}} + \mathbf{N}_{\text{psr}}$$

$$\mathbf{N}_{\text{mag}} = -\frac{\mu^2}{3r_{\text{co}}^3} \mathbf{s}$$

\mathbf{N}_{mag} работает только когда $r_m < r_{\text{LC}}$

$$\mathbf{N}_{\text{psr}} = K_{\text{psr}} \left\{ (1 + \sin^2 \chi) \mathbf{s} + ((\mathbf{m} \times \mathbf{s}) \times \mathbf{s}) \cos \chi \right\}$$

$$K_{\text{psr}} = -\mu^2 / r_{\text{LC}}^3$$

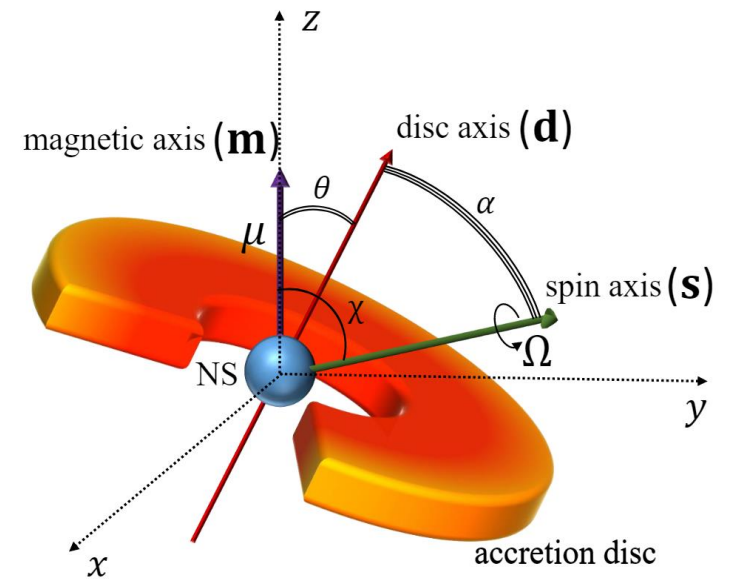
Эволюция вращения аккрецирующей НЗ

$$I \left\langle \frac{d\Omega}{dt} \right\rangle = K_{\text{psr}} (1 + \sin^2 \chi) + N_0 \cos \alpha + N_{\text{mag}} - \frac{dI}{dt} \Omega$$

$$I\Omega \left\langle \frac{d\chi}{dt} \right\rangle = K_{\text{psr}} \sin \chi \cos \chi + \eta A(\eta, \alpha, \chi) N_0 \sin^2 \alpha \cos \alpha \sin \chi \cos \chi$$

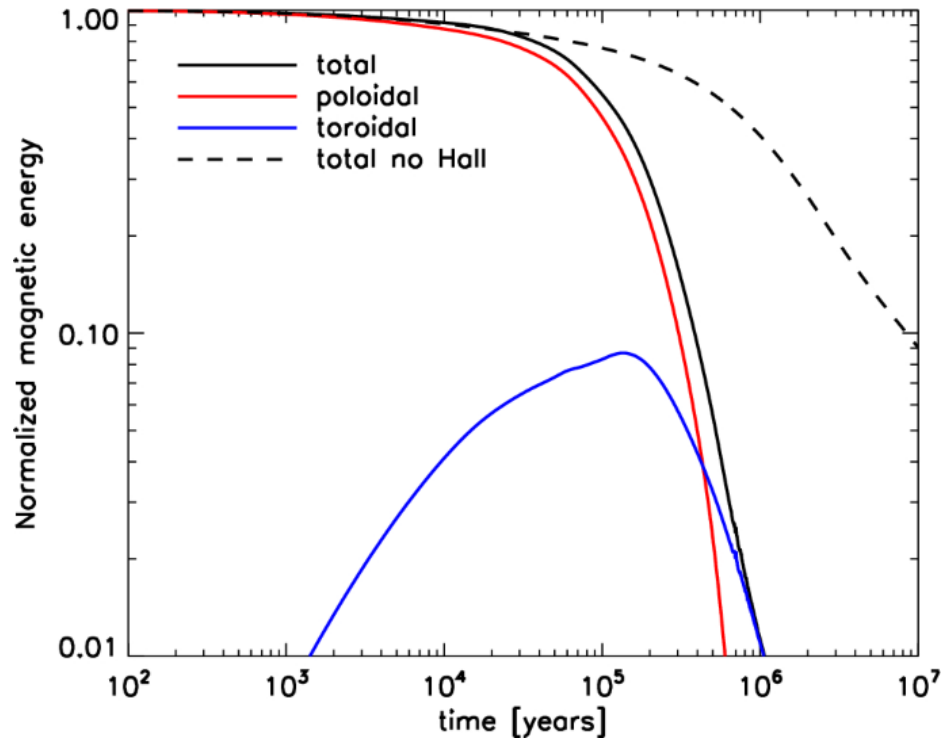
$$I\Omega \left\langle \frac{d\alpha}{dt} \right\rangle = -N_0 \sin \alpha$$

$$I \simeq 10^{45} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right) \text{ g cm}^2 \quad (\text{AB et al., 1702.00018})$$



$$\langle f \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f d\psi$$

Эволюция магнитного поля



Pons & Viganò, 1911.03095

Igoshev & Popov, 1507.07962
 AB et al., 1711.05081

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{\Delta M_*}{\mathcal{M}} \right)^{-14/11}$$

$$\mathcal{M} = 1.1 \times 10^{-5} \dot{M}_1^{1/7} \mu_{0,30}^{3/14} R_{12.5}^3 M_\odot$$

(Melatos & Phinney, 2001, PASA, 18, 421)

$$\dot{M}_1 = \frac{\dot{M}}{\dot{M}_{\text{Edd},\odot}}$$

$$\dot{M}_{\text{Edd},\odot} = \frac{4\pi G M_\odot}{\kappa_T c} \approx 1.6 \times 10^{17} \text{ g s}^{-1}$$

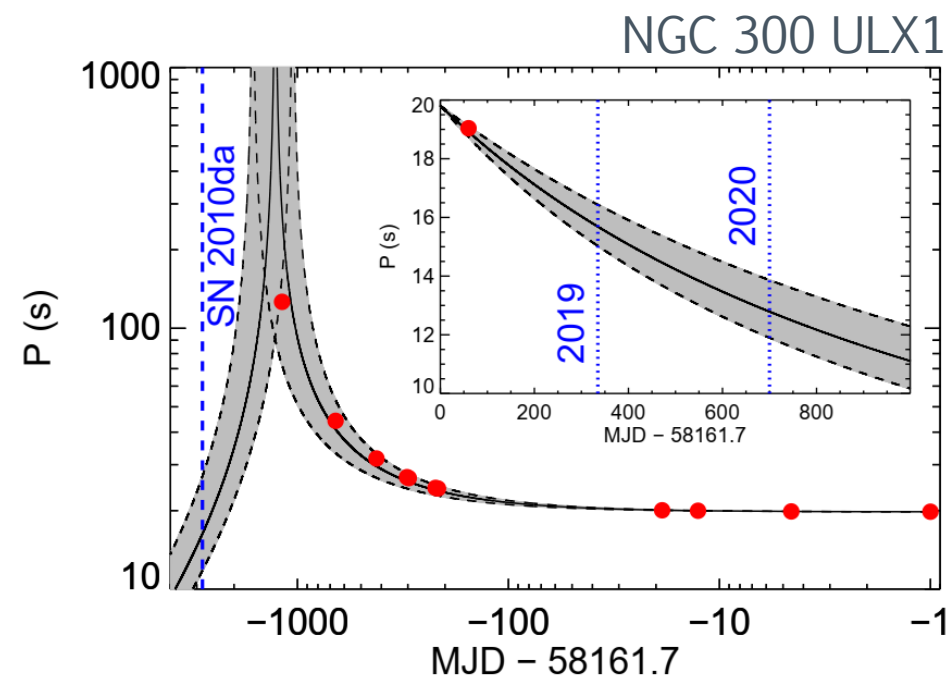
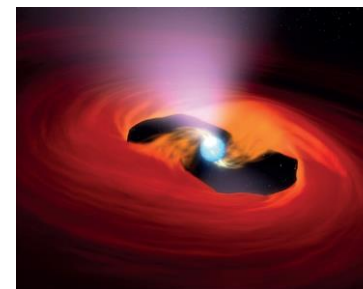
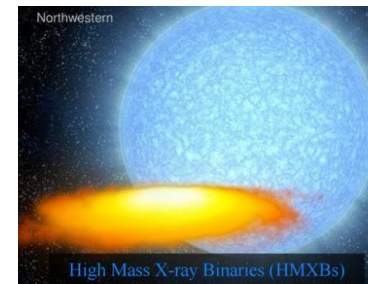
$$\tau_{\text{bur}} = -\frac{\mu}{\dot{\mu}} \approx 3.4 \times 10^3 \dot{M}_1^{-6/7} \mu_{0,30}^{3/14} R_{12.5}^3 \text{ yr}$$

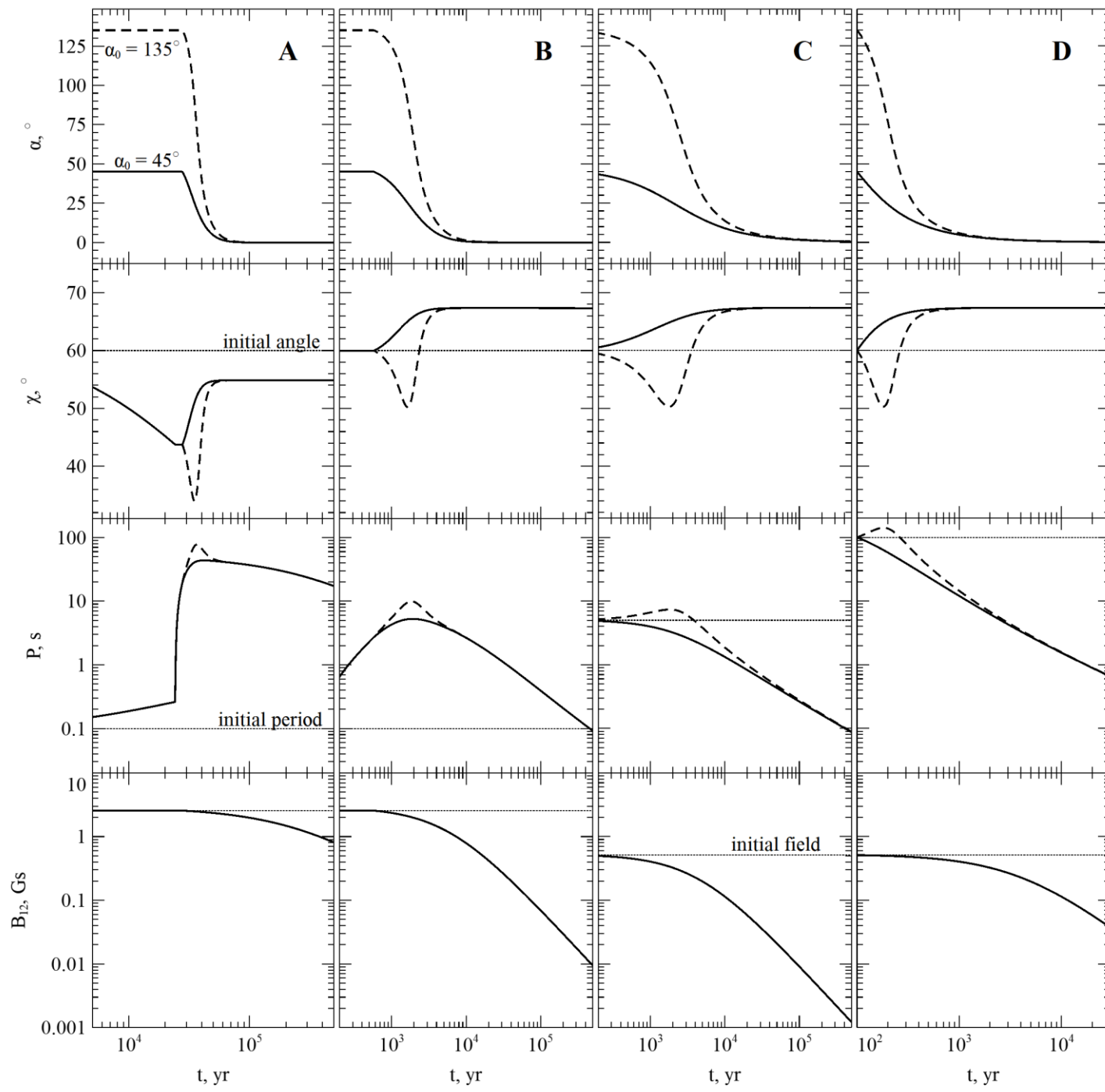
Результаты

Игрушечные модели

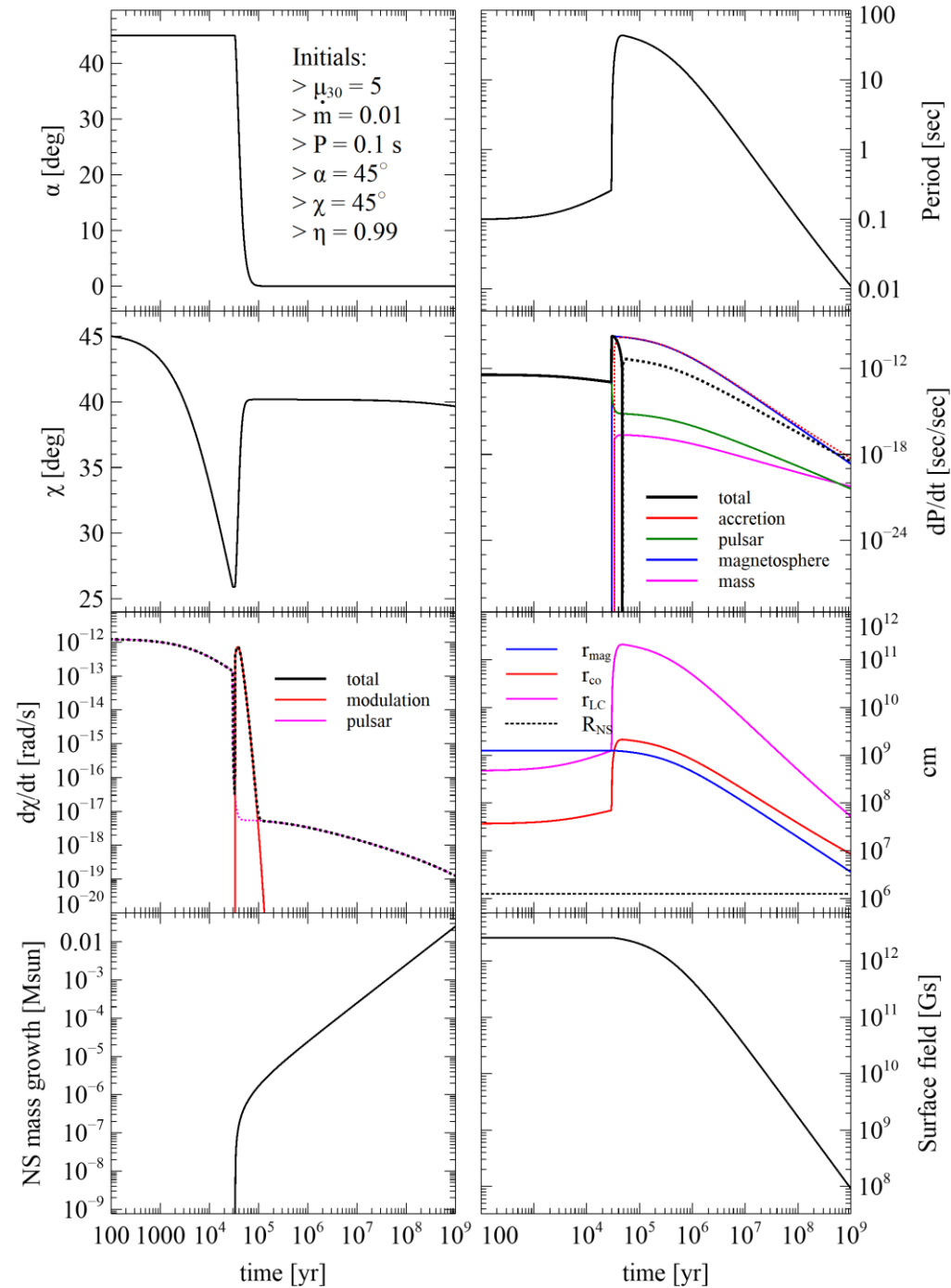
Model	P_0 , sec	$\mu_{0,30}$	M_1
A	0.1	5.0	0.01
B	0.1	5.0	1.0
C	5.0	1.0	1.0
D	100.0	1.0	1.0

$$\chi_0 = 60^\circ, \alpha_0 = 45^\circ \text{ или } 135^\circ$$

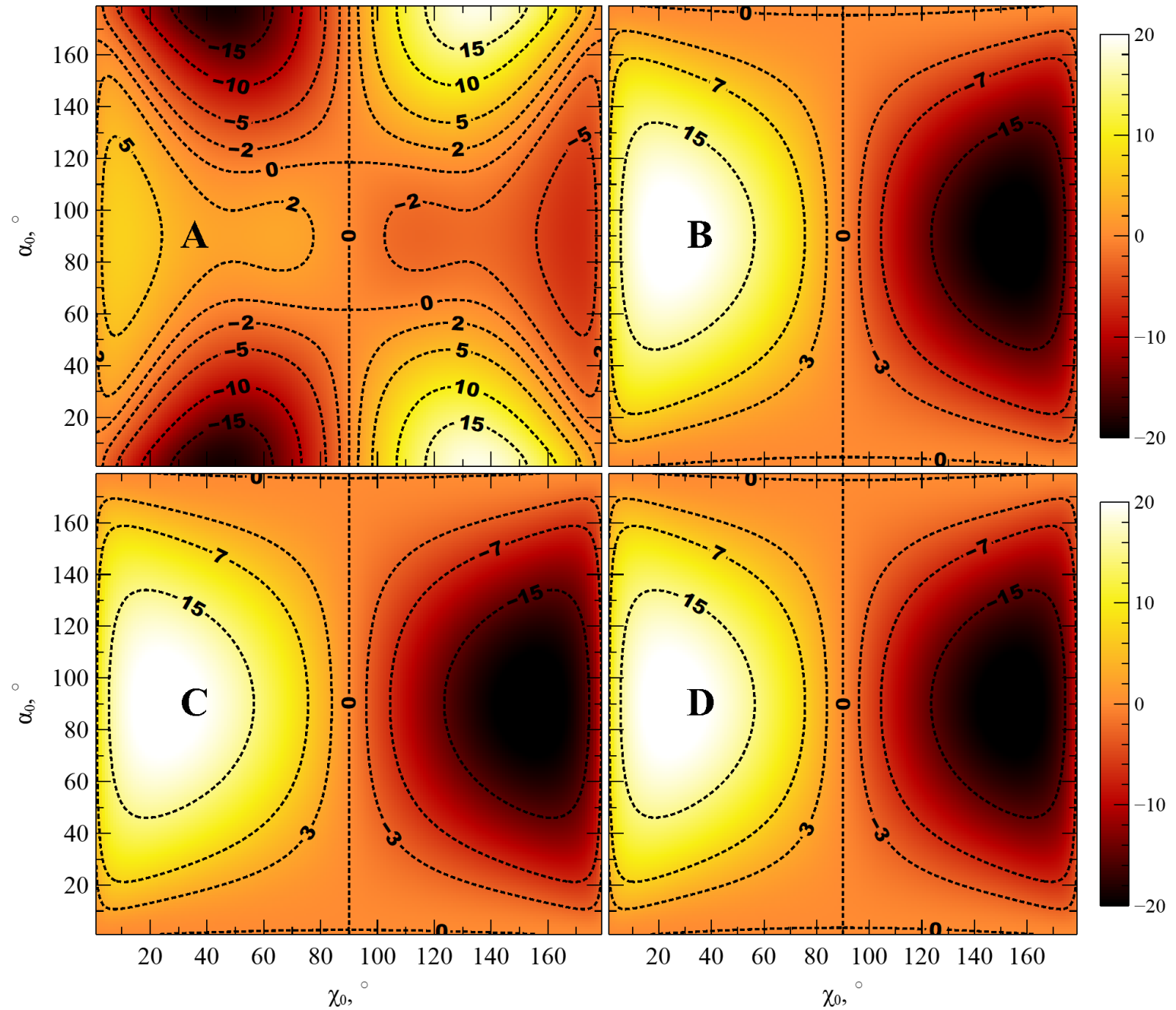




Model	P_0 , sec	$\mu_{0,30}$	M_1
A	0.1	5.0	0.01
B	0.1	5.0	1.0
C	5.0	1.0	1.0
D	100.0	1.0	1.0

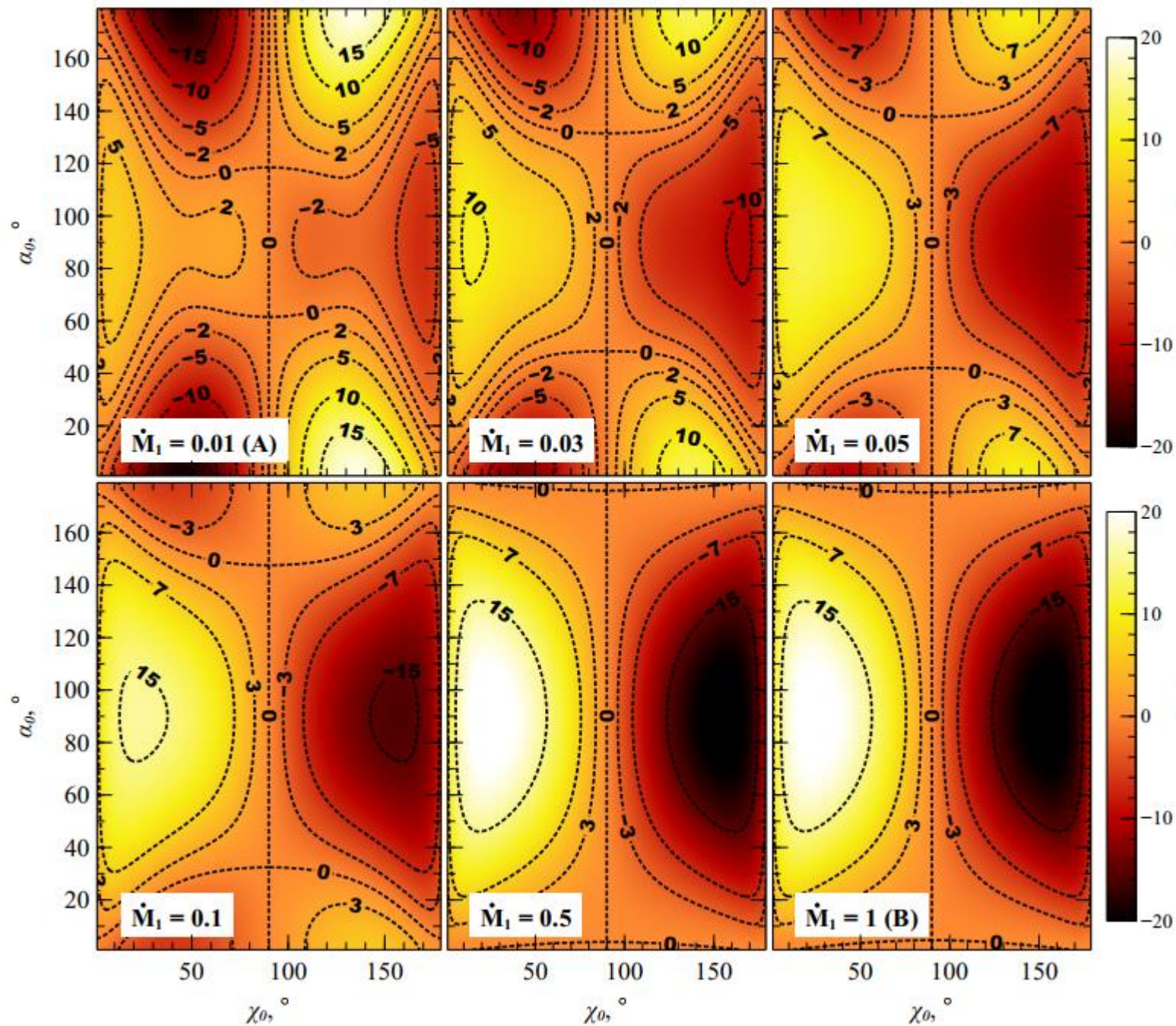


- До начала аккреции доминирует пульсарный механизм
- В ходе аккреции, пока НЗ не выровнена с диском, доминирует модуляция аккреции
- После выравнивания, модуляция выключается, а пульсарный механизм неэффективен



Model	P_0 , sec	$\mu_{0,30}$	M_1
A	0.1	5.0	0.01
B	0.1	5.0	1.0
C	5.0	1.0	1.0
D	100.0	1.0	1.0

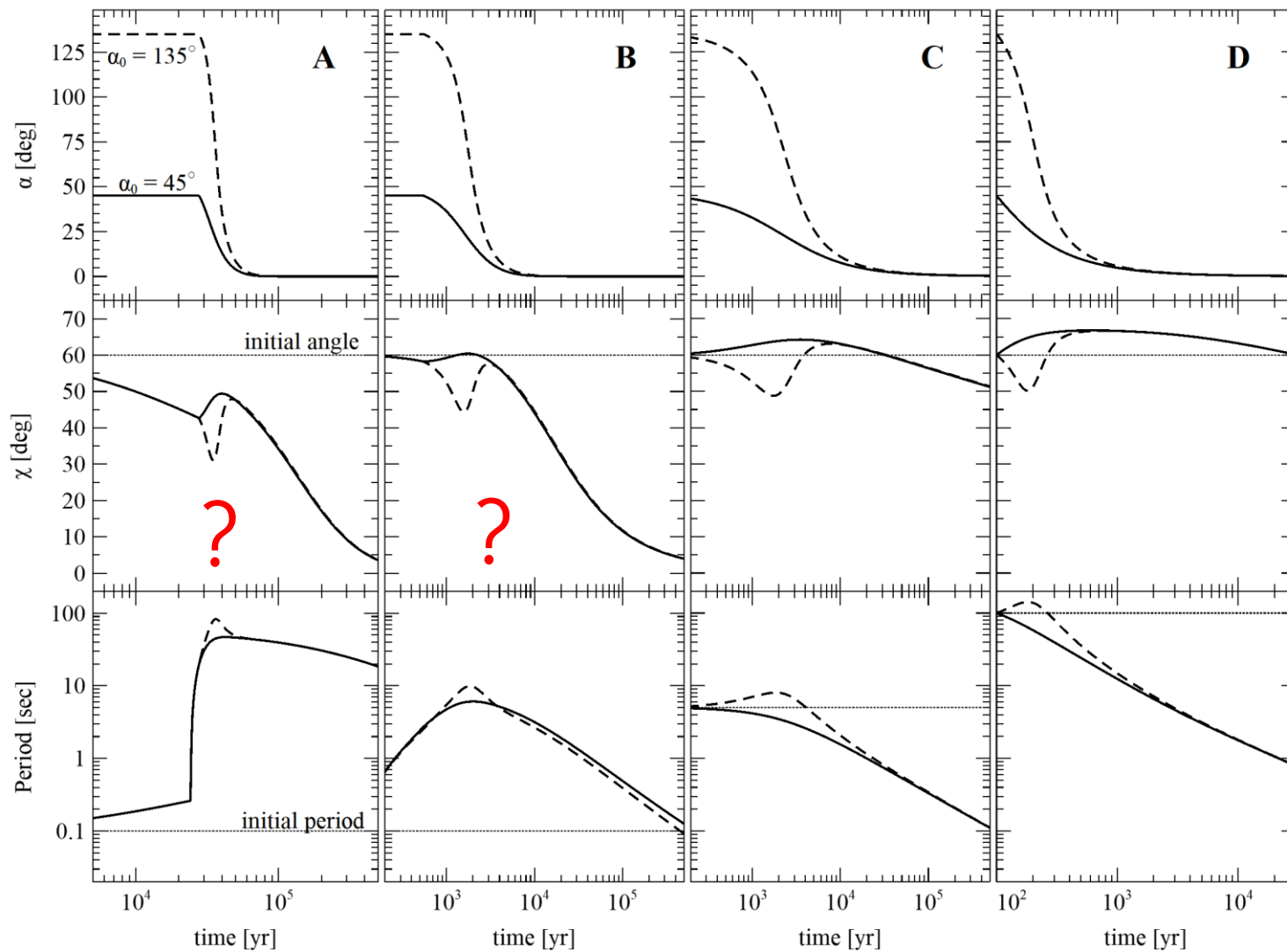
$\Delta\chi$ за 10^5 лет эволюции.



Model	P_0 , sec	$\mu_{0,30}$	M_1
A	0.1	5.0	0.01
B	0.1	5.0	1.0
C	5.0	1.0	1.0
D	100.0	1.0	1.0

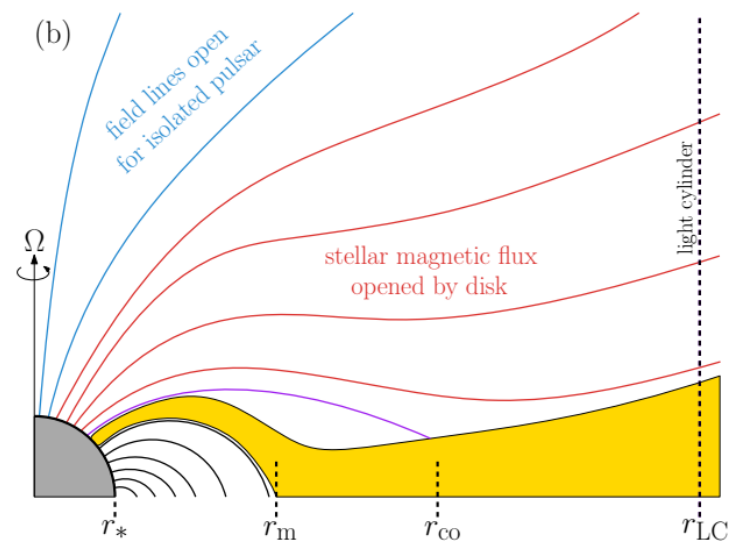
$\Delta\chi$ за 10^5 лет эволюции.

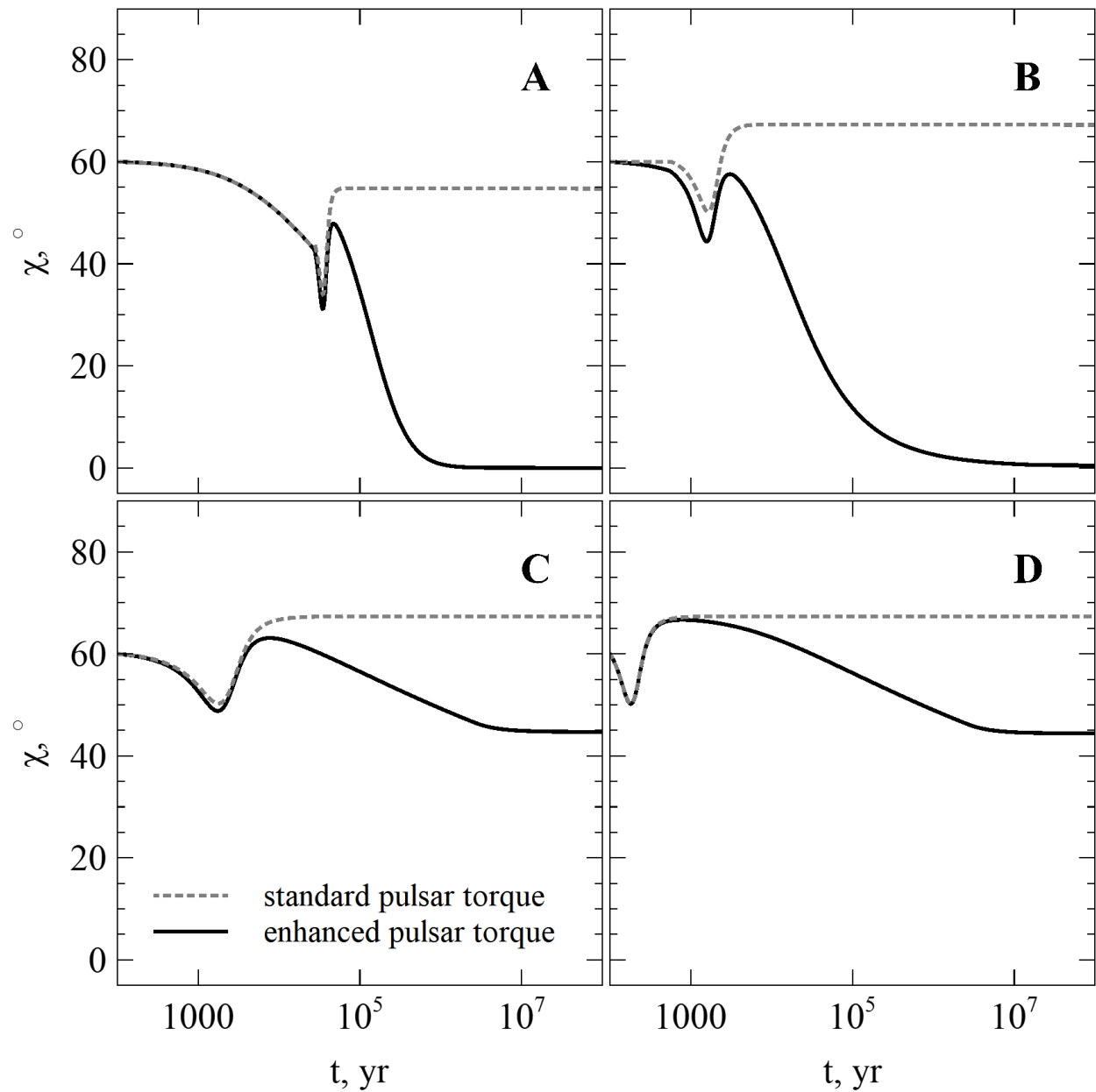
Дополнения к модели



Model	P_0 , sec	$\mu_{0,30}$	M_1
A	0.1	5.0	0.01
B	0.1	5.0	1.0
C	5.0	1.0	1.0
D	100.0	1.0	1.0

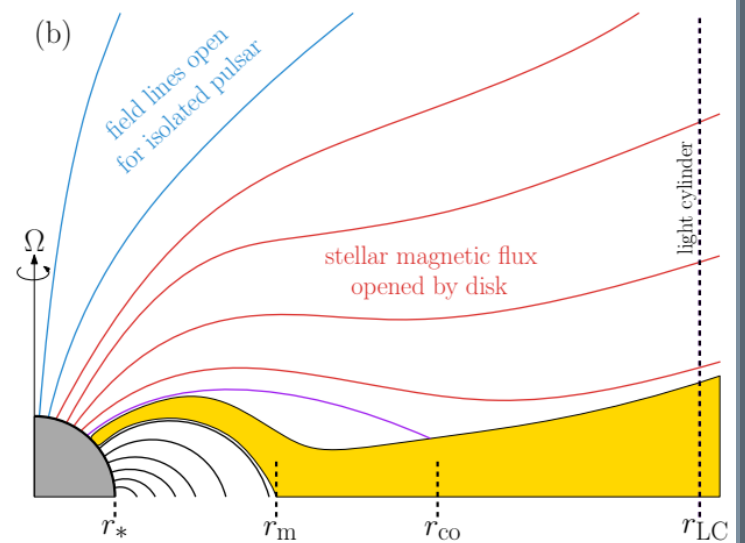
$$K_{\text{psr}}^* \approx \left(\frac{r_{\text{LC}}}{r_{\text{m}}} \right)^2 K_{\text{psr}}$$





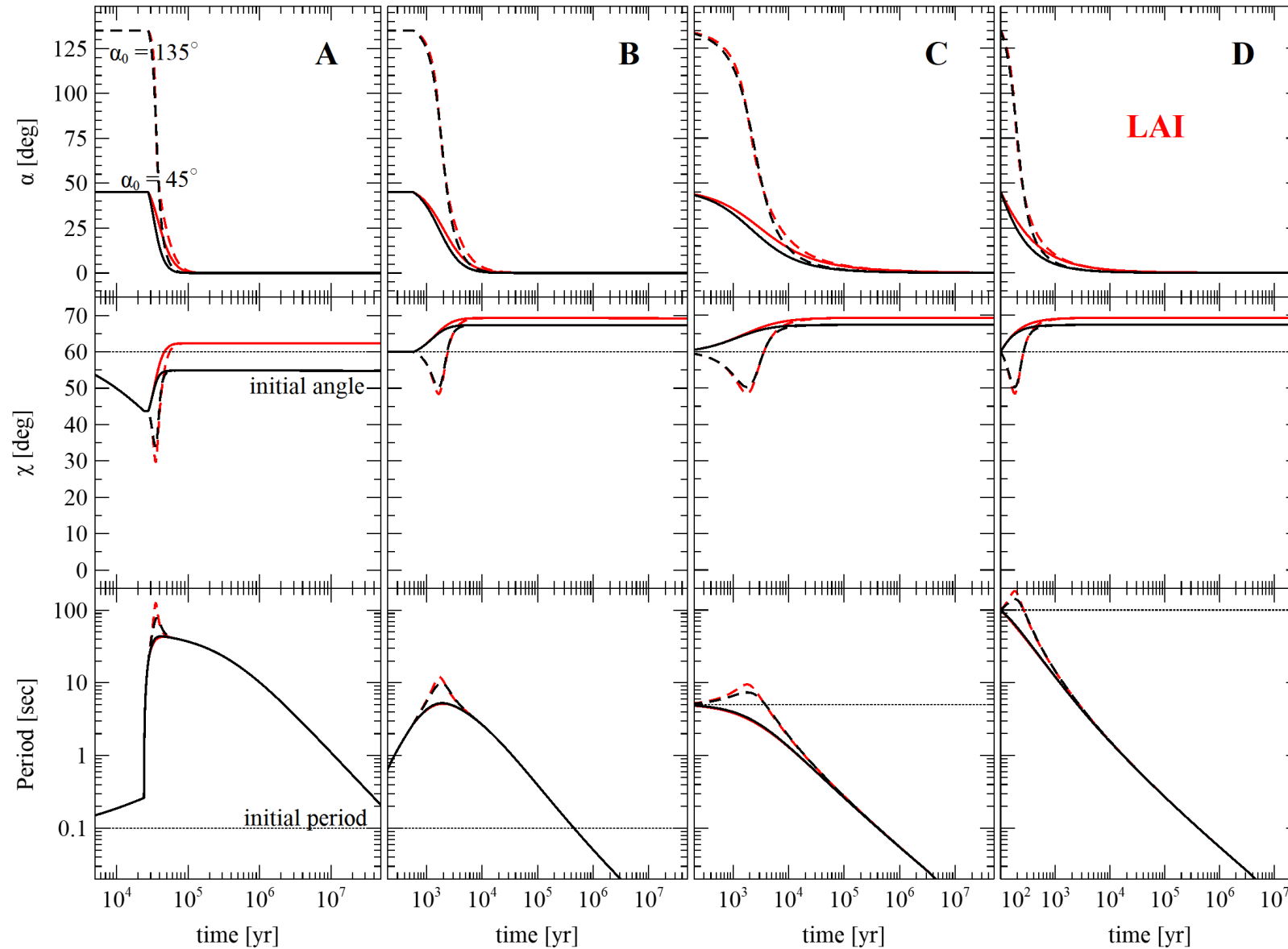
Model	P_0 , sec	$\mu_{0,30}$	\dot{M}_1
A	0.1	5.0	0.01
B	0.1	5.0	1.0
C	5.0	1.0	1.0
D	100.0	1.0	1.0

$$K_{\text{psr}}^* \approx \left(\frac{r_{\text{LC}}}{r_{\text{m}}} \right)^2 K_{\text{psr}}$$

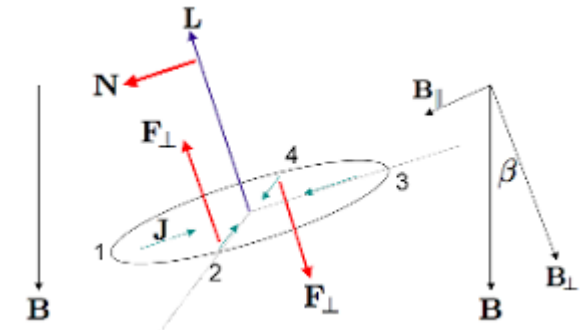


$$N_{\text{warp}} = \frac{1}{6} \xi^{-7/2} N_0 \cos^2 \chi \cos \alpha (\mathbf{d} \times (\mathbf{s} \times \mathbf{d}))$$

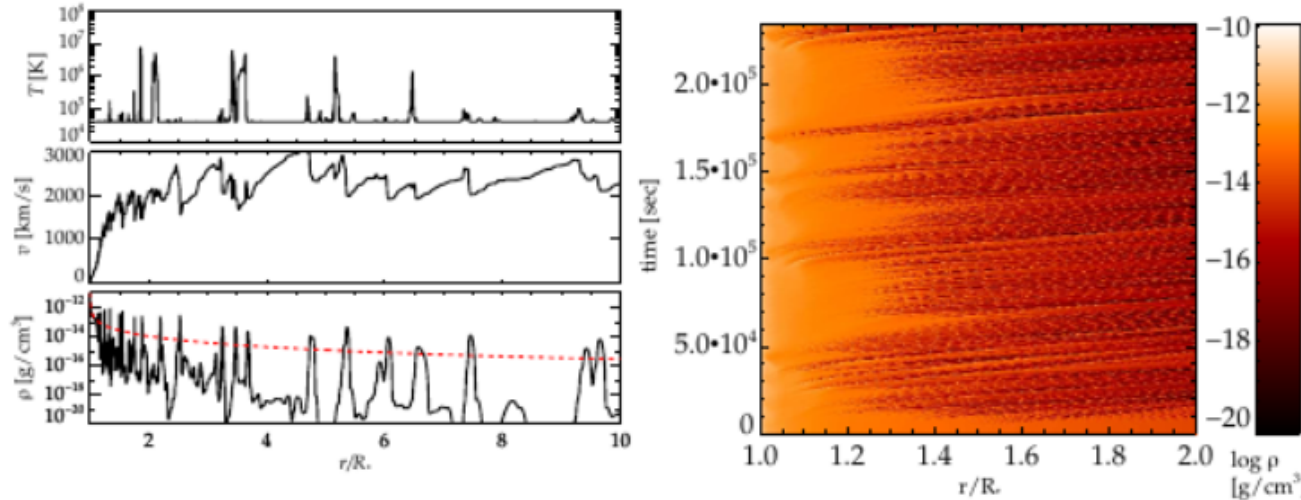
Model	P_0 , sec	$\mu_{0,30}$	M_1
A	0.1	5.0	0.01
B	0.1	5.0	1.0
C	5.0	1.0	1.0
D	100.0	1.0	1.0



Lai et al., MNRAS,
2011



Line-driven winds of OB-stars are extremely clumpy



from Martínez-Núñez et al.(2017)

- ▶ \Rightarrow accretion torque is a randomly directed quantity
- ▶ α does not approach 0

$$I\Omega \frac{d\chi}{dt} \simeq \eta N_0 \underbrace{\sin^2 \alpha \cos \alpha}_{\text{random}} \sin \chi \cos \chi \quad (13)$$

If α is random polar distance on a sphere,

$$\frac{d}{dt} (\ln \tan \chi) = \eta A \frac{N_0}{I\Omega} \sin^2 \alpha \cos \alpha \quad (14)$$

Average over α :

$$\left\langle \frac{d}{dt} (\ln \tan \chi) \right\rangle_{\alpha} = 0, \quad (15)$$

If the characteristic time scale of a stable accretion direction (single clump accretion) is τ_{α} , we have random walk in t/τ_{α}

$$\left\langle (\ln \tan \chi)^2 \right\rangle_{\alpha} \simeq \frac{8}{105} \eta^2 A^2 \left(\frac{N_0}{I\Omega} \right)^2 \tau_{\alpha} t. \quad (16)$$

Resulting distribution is

$$\frac{dN}{d\chi} \propto \frac{1}{|\sin \chi \cos \chi|}. \quad (17)$$

ВЫВОДЫ

- › Дисковая аккреция на нейтронную звезду приводит к её магнитной ортогонализации.
- › Магнитная ось звезды меняет свой наклон на величину до 10-25 градусов за короткий период выравнивания звезды.
- › Финальный магнитный угол миллисекундного пульсара зависит от начального состояния системы.
- › Так, возможно бимодальное распределение χ для MSP?

Спасибо! 😊