

# Начальное распределение магнитных углов радиопульсаров

Екатерина Токарева (НИЯУ МИФИ), Антон Бирюков (ГАИШ МГУ, К(П)ФУ),

e.tokareva135@gmail.com, ant.biryukov@gmail.com

## Коротко о работе

- Впервые получены совместные оценки начальных значений углов  $\alpha_0$  между магнитной осью и осью вращения пульсара (магнитных углов), а также периодов  $P_0$  для 35 одиночных радиопульсаров с известными кинематическими возрастными (в интервале 0.1-10 млн. лет). Начальные углы рассчитывались в рамках МГД-модели эволюции вращения НЗ, предполагающей выравнивание магнитной оси нейтронной звезды с течением жизни [Philippov et al. 2014]. Кроме того, учитывалось затухание магнитного поля НЗ;
- Показано, что распределение  $\alpha_0$  для пульсаров выборки скорее близко к изотропному ( $p(\alpha_0) \sim \sin \alpha_0$ ) чем к однородному;
- Объекты выборки не показывают сильной зависимости между  $\alpha_0$  и начальными периодом  $P_0$ . Однако, некоторый возможный тренд в этой зависимости всё же присутствует, что делает её объектом дальнейшего изучения;
- Обнаружено, что предположение о сравнительно быстром затухании магнитного поля пульсаров приводит к формальному противоречию наблюдательных данных (значений  $\alpha$ ,  $P$ ,  $\dot{P}$ , возраста  $t$ ) и используемой модели замедления. Что позволяет независимо ограничить темп затухания магнитного поля.

## Метод определения $\alpha_0$ и $P_0$ . Эволюция магнитного поля $B(t)$

Рассматривались 39 одиночных радиопульсаров, для которых ранее были получены оценки их текущих магнитных углов [Lyne & Manchester 1988, Rankin 1993] и независимые оценки возрастов. А именно, использовались оценки кинематических возрастов пульсаров, полученные в работах [Noutsos et al. 2013, Igoshev 2019]. Всего было найдено 39 таких пульсаров. Принималось, что эволюция пульсаров описывается парой уравнений вида [Philippov et al. 2014]:

$$P\dot{P} = 4\pi^2 KB(t)^2(1 + \sin^2 \alpha) \quad (1)$$

для эволюции периода вращения  $P(t)$  и

$$P^2\dot{\alpha} = -4\pi^2 KB(t)^2 \sin \alpha \cos \alpha, \quad (2)$$

для эволюции магнитного угла  $\alpha(t)$ . Здесь  $K = R^6/Ic^3 \approx 3.7 \times 10^{-41}$  см  $c^3$  г $^{-1}$  – коэффициент, зависящий от радиуса и момента инерции нейтронной звезды, а  $B(t)$  – магнитное поле на поверхности звезды, эволюция которого описывалась простым аналитическим приближением, близким к тому, что было найдено [Colpi et al. 2000]:

$$B(t) = B_0 \left(1 + \frac{t}{t_m}\right)^{-\beta}, \quad (3)$$

с той разницей, что в данной модели время “излома” при затухании поля  $t_m \sim 10^5 \dots 10^6$  лет не зависит от начального поля  $B_0$ . Величина же начального поля оценивалась из закона замедления (1) стандартным способом  $B_0^2 = P\dot{P}(1 + \sin^2 \alpha)^{-1}/4\pi^2$ . Из уравнений (1) и (2) следует уравнение для начального магнитного угла  $\alpha_0$ :

$$\frac{1}{\sin^2 \alpha_0} + \ln(\sin^2 \alpha_0) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} + \ln(\sin^2 \alpha) - K \cdot \frac{8\pi^2 \cos^4 \alpha}{P^2 \sin^2 \alpha} \cdot \int_0^t B^2(t) dt, \quad (4)$$

которое может быть решено численно для данных  $P$ ,  $\dot{P}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и возраста пульсара  $t$ . Затем согласованная величина начального периода может быть получена из сохранения комбинации  $P \sin \alpha / \cos^2 \alpha$  [Philippov et al. 2014]. То есть

$$P_0 = P \frac{\sin \alpha \cos^2 \alpha_0}{\cos^2 \alpha \sin \alpha_0} \quad (5)$$

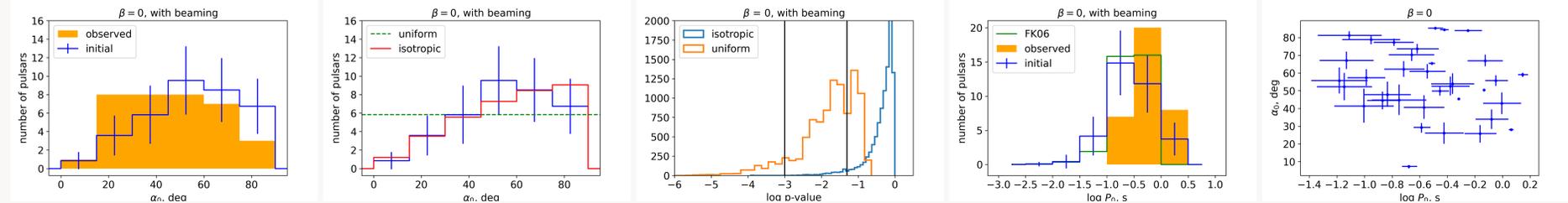
Интересно, что, уравнение (4) имеет действительное решение ( $\sin^2 \alpha_0 < 1$ ) не при любых наборах  $(\alpha, P, \dot{P}, t)$  для заданных  $\beta$  и  $t_m$ . Что позволило независимо ограничить значения этих параметров:  $t_m > 10^5$  лет и  $\beta < 0.2$ . Так, 4 из 39 пульсаров формально противоречат используемой модели эволюции вращения НЗ (с учётом неопределённости возрастов  $t$ ) даже при отсутствии затухания поля ( $\beta = 0$ ). А при затухании более сильном чем  $(t_m, \beta) = (10^5 \text{ лет}, 0.2)$  количество таких объектов в выборке начинает очень быстро расти.

## Результаты

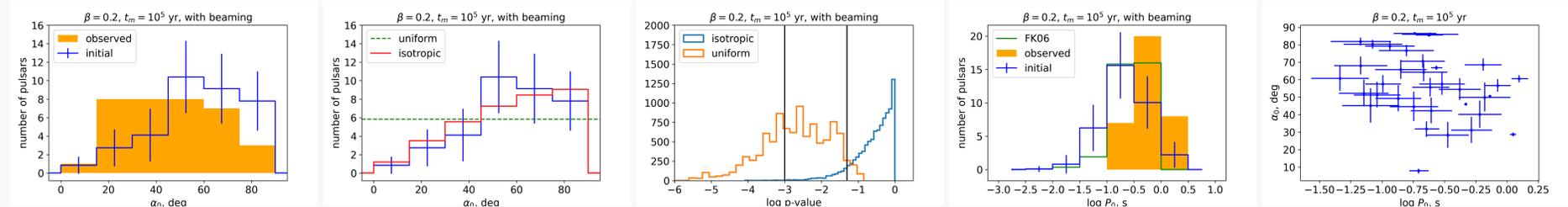
На рисунках справа показаны полученные распределения начальных параметров рассматриваемых пульсаров (с учётом ошибок измерения текущих возрастов и магнитных углов).

- На графиках **распределение начальных параметров показано синим цветом**. **Наблюдаемое распределение показано желтым цветом**. Основной вклад в ошибки бинов дают ошибки оценок кинематических возрастов пульсаров. Теоретические (модельные) распределения показаны **зелёным (равномерное) и красным (изотропное) цветом**.
- При построении распределения учтен геометрический эффект селекции, а именно то, что вероятность попадания наблюдателя в диаграмму направленности пульсара (beaming fraction) зависит от его текущего магнитного угла как  $f = 2 \sin \rho \sin \alpha$ , где  $\rho \propto 1/\sqrt{P}$  – угол раствора диаграммы.
- Пользуясь критерием типа критерия Пирсона  $\chi^2$  (но с учётом корректного распределения статистики в рамках нулевой гипотезы) были рассчитаны распределения соответствующих р-значений для сравнения полученного распределения  $\alpha_0$  и модельных. На соответствующих графиках вертикальными линиями отмечены уровни значимости  $10^{-3}$  и  $0.05$ . Видно, что если точно нельзя отвергнуть гипотезу об изотропности  $p(\alpha_0)$ , то однозначно отвергнуть гипотезу об однородности нельзя. Последнее, по видимому, связано с уменьшением количества пульсаров, рождающихся с углами  $> 50^\circ$ .
- Распределение начальных периодов оказывается близким к тому, что было получено в рамках популяционного синтеза [Faucher-Giguere Kaspi 2006] со средним  $P_0 \sim 0.5$  сек.
- Наконец, на последнем графике показана зависимость между начальными значениями  $\alpha_0(P_0)$ , интерпретация которой является предметом дальнейшего исследования.

Результаты в отсутствие затухания поля:



Результаты при наиболее сильном затухании поля ( $t_m = 10^5$  лет,  $\beta = 0.2$ ):



## Выводы

- Начальные магнитные углы пульсаров из рассматриваемой выборки имеют распределение близкое к изотропному  $p(\alpha_0) \sim \sin(\alpha_0)$
- Большие ошибки измерения возрастов и магнитных углов пульсаров не позволяют сделать однозначный вывод об отсутствии/наличии корреляции между их начальными параметрами  $P_0$  и  $\alpha_0$
- Предположение о существенном затухании магнитного поля ( $t_m < 10^5$  лет,  $\beta > 0.2$ ) приводит к противоречию между наблюдаемыми параметрами ( $P$ ,  $\dot{P}$ ,  $\alpha$  и возраст  $t$ ) и принимаемой моделью замедления.

## Литература

- Philippov, Tchekhovskoy & Li, 2014, MNRAS, 441, 1879, arXiv:1311.1513  
 Rankin, 1993, ApJS, 85, 145  
 Lyne & Manchester, 1988, MNRAS, 234, 477  
 Noutsos et al., 2013, MNRAS, 430, 2281, arXiv:1301.1265  
 Igoshev, 2019, MNRAS, 482, 3415, arXiv:1810.12922  
 Colpi, Geppert & Page, 2000, ApJ. Lett., 529, L29, arXiv:astro-ph/9912066  
 Faucher-Giguere & Kaspi, 2006, ApJ, 643, 332, arXiv:astro-ph/0512585