

Статистика интеримпульсных пульсаров

Дерри С.Т., Арзамасский Л.И., Бескин В.С.

Московский Физико-Технический Институт

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук



Введение

Спустя 45 лет после открытия пульсаров вопрос об их эволюции все еще не решен до конца. В частности, до сих пор не ясно, как меняется угол между магнитным моментом нейтронной звезды и ее осью вращения. В работе [1] (далее – BGI) была предложена аналитическая модель торможения, в рамках которой угол наклона со временем приближается к 90 градусам. Позже численные МГД-расчеты [2] (далее – MHD), посвященные построению самосогласованной модели магнитосферы радиопульсаров показали, что угол наклона должен, напротив, уменьшаться со временем. При этом обе модели дают приблизительно равные значения производной периода вращения (которую мы знаем точно из наблюдений), но, как мы видим, совершенно разные значения производной угла наклона (информации о которой у нас практически нет). Поэтому вопрос об эволюции радиопульсаров до сих пор остается открытым.

Статистика интеримпульсных пульсаров

Интеримпульсные пульсары дают нам возможность оценить угол наклона осей с хорошей точностью. Интеримпульс возникает либо в результате наблюдения противоположных полюсов (тогда угол близок к 90 градусам, такие пульсары мы назовем двухполюсными, или double pole – DP), либо в результате повторного наблюдения одного и того же полюса (тогда угол близок к 0 градусам, такие пульсары будут однополюсными, или single pole – SP).

Наблюдаемые пульсары были распределены по группам по периодам: от 0.1 до 0.4 секунды, от 0.4 до 0.7 секунд и от 0.7-1 секунды (рис 1). Пульсары с периодами более одной секунды не учитывались из-за их малого количества.

Однополюсные интеримпульсные пульсары

Для SP пульсаров можно сделать следующую простую оценку угла наклона. При малых углах χ диаграмма направленности и траектория линии зрения приблизительно лежат в одной плоскости и угол можно оценить по значению разности времен прихода импульса и интеримпульса η , которое известно из наблюдений (см. рис. 2). При этом предполагается, что излучение возникает в малой области рядом с границей диаграммы. На рисунке 1 показаны SP пульсары на диаграмме угол – период, с углом, определенным таким образом. Видно, что их число сильно падает с периодом, что находится в полном согласии с BGI моделью.

Однако такая оценка угла наклона является оценкой сверху. Излучение может возникать не только рядом с границей диаграммы направленности. Если предположить, что импульсы возникают в произвольных точках диаграммы, то для возникновения SP интеримпульса необходимо, чтобы $\eta = 2\pi$. Это соответствует условию $|\chi + \xi|_{SP} \leq \frac{W_0}{\sqrt{P}}$ и является оценкой снизу для угол наклона. Истинный угол лежит между значениями, полученными этими способами.

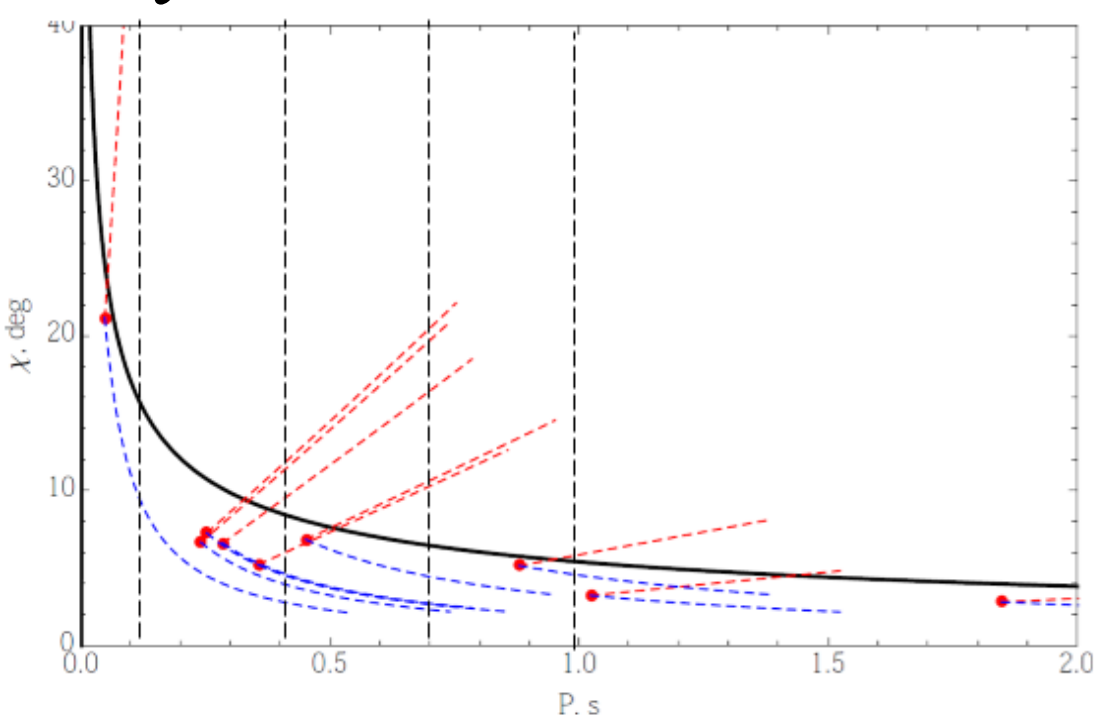


Рис.1. На графике показаны однополюсные пульсары, распределенные по периодам и дальнейшая эволюция углов полярной оси. Красным обозначена эволюция пульсаров согласно модели BGI (угол эволюционирует к 90 градусам), синим обозначена эволюция пульсаров согласно МГД модели (к 0 градусам).

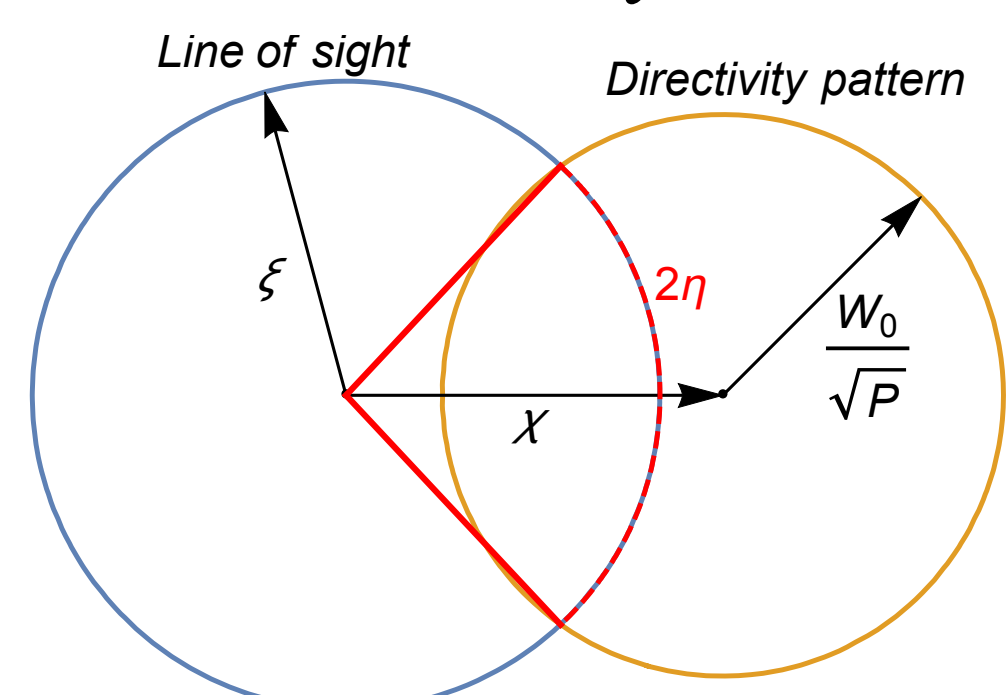


Рис.2. График, показывающий пересечение диаграммы направленности (оранжевая линия) с лучом зрения (синяя линия). Если излучение возникает на границе диаграммы направленности, то расстояние между импульсом и интеримпульсом равно 2η . По результатам его наблюдений можно определить верхнюю границу угла наклона.

Двухполюсные интеримпульсные пульсары

Для DP пульсаров ситуация усложняется отсутствием модели диаграммы направленности при больших углах наклона. При углах χ , близких к 90 градусам, линия нулевой гольдрайховской плотности пересекает диаграмму, поэтому число DP пульсаров должно быть меньше простейшей оценки $|180 - \chi - \xi|_{DP} \leq \frac{W_0}{\sqrt{P}}$, поэтому мы не будем рассматривать этот эффект.

Кинетическое уравнение

Один из вариантов решения проблемы анализа эволюции угла наклона магнитной оси состоит в решении кинетического уравнения для различных моделей эволюции для получения функции распределения пульсаров.

$$\begin{aligned} \text{BGI} \quad \frac{\partial}{\partial P} N \dot{P} + \frac{\partial}{\partial \chi} \dot{\chi} N &= Q \\ \dot{P}_{-15} &= B_{12}^{10/7} (\cos \chi)^{2d} \\ \dot{\chi}_{-15} &= P^{-1} B_{12}^{10/7} (\cos \chi)^{2d-1} \sin \chi \\ I(P, \chi) &= P / \sin \chi \end{aligned} \quad \begin{aligned} \text{MHD} \\ \dot{P} &\propto B_{12}^2 P^{-1} (1 + \sin^2 \chi) \\ \dot{\chi} &\propto B_{12}^2 P^{-2} \sin \chi \cos \chi \\ I(P, \chi) &= P \sin \chi / \cos^2 \chi \end{aligned}$$

Здесь представлены уравнения эволюции пульсара, а также интегралы движения I . Функция Q является функцией рождения, которая зависит от угла наклона, угла на наблюдателя, начального периода и магнитного поля.

Точные решения

В данном подходе удастся найти точное решение кинетического уравнения для любых начальных функциях распределения, при условии, что они независимы. Решение имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} N_{\text{MHD}} &\propto \frac{Q_{B_{12}}}{B_{12}^2} Q_{\xi} \frac{P^2}{\cos^3 \chi} \int_0^{\pi/2} \frac{\cos^2 x}{\sin x} Q_{\chi}(x) Q_P \left(P \frac{\sin \chi \cos^2 x}{\sin x \cos^2 \chi} \right) dx \\ N_{\text{BGI}} &\propto \frac{Q_{B_{12}}}{B_{12}^{10/7}} Q_{\xi} \frac{P}{\cos \chi \sin^2 \chi} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin x}{\cos^{2d-2} x} Q_{\chi}(x) Q_P \left(P \frac{\sin x}{\sin \chi} \right) dx \end{aligned}$$

Было проведено исследование этих решений в простейшем случае равномерной функции распределения по углам и периодам, а также синусоидальной и равномерной функции распределения по углам на наблюдателя.

Данные выражения находятся в хорошем согласии с результатами симуляции и методом Монте-Карло (см. рис. 3).

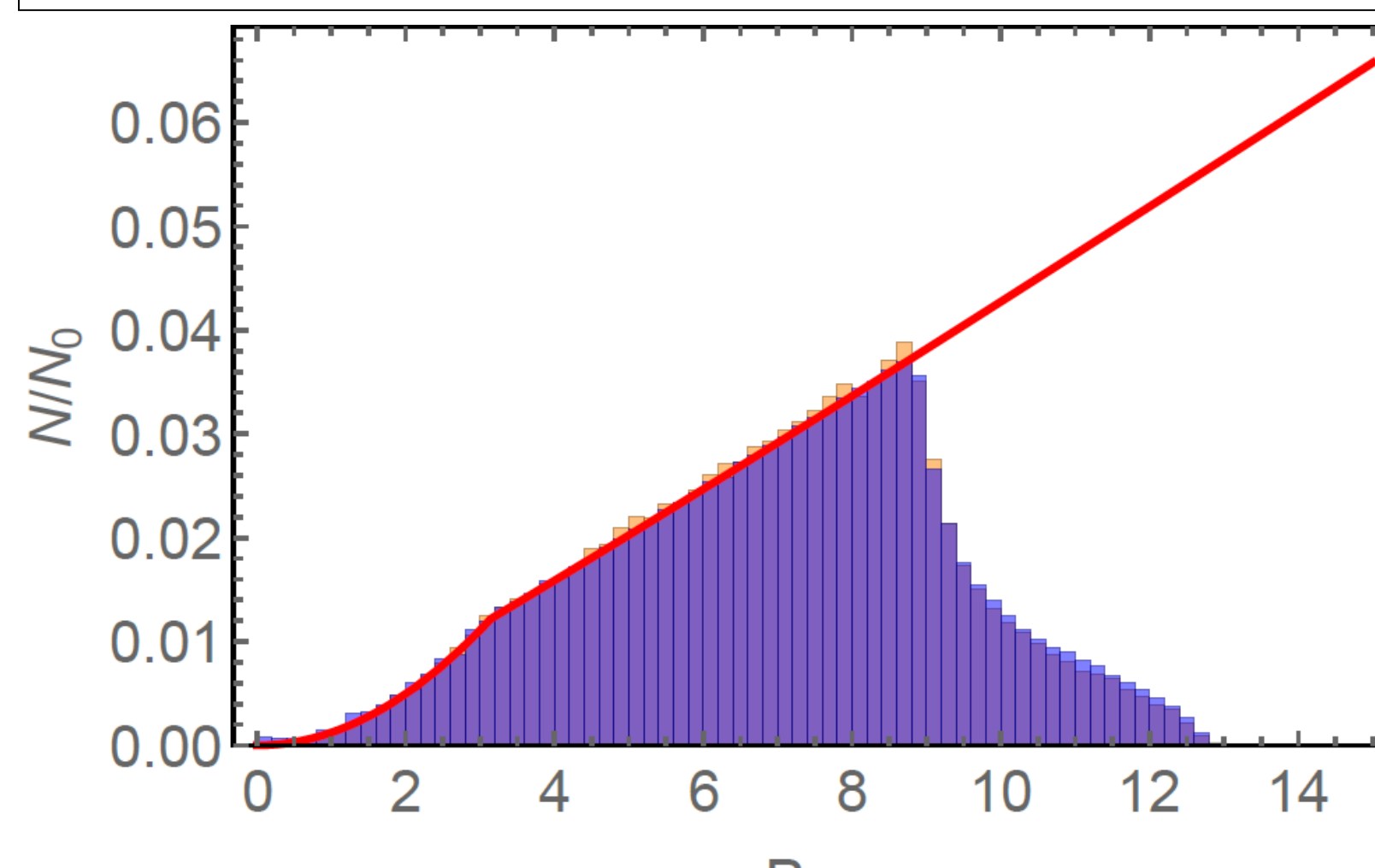


Рис.3. Сравнение МК симуляций (фиолетовый) с аналитическим решением (красный). Большое отличие при больших периодах связано с конечным временем интегрирования в Монте-Карло моделировании. При достаточно большом времени симуляций можно добиться отличного согласия в интересующей области значений периода.

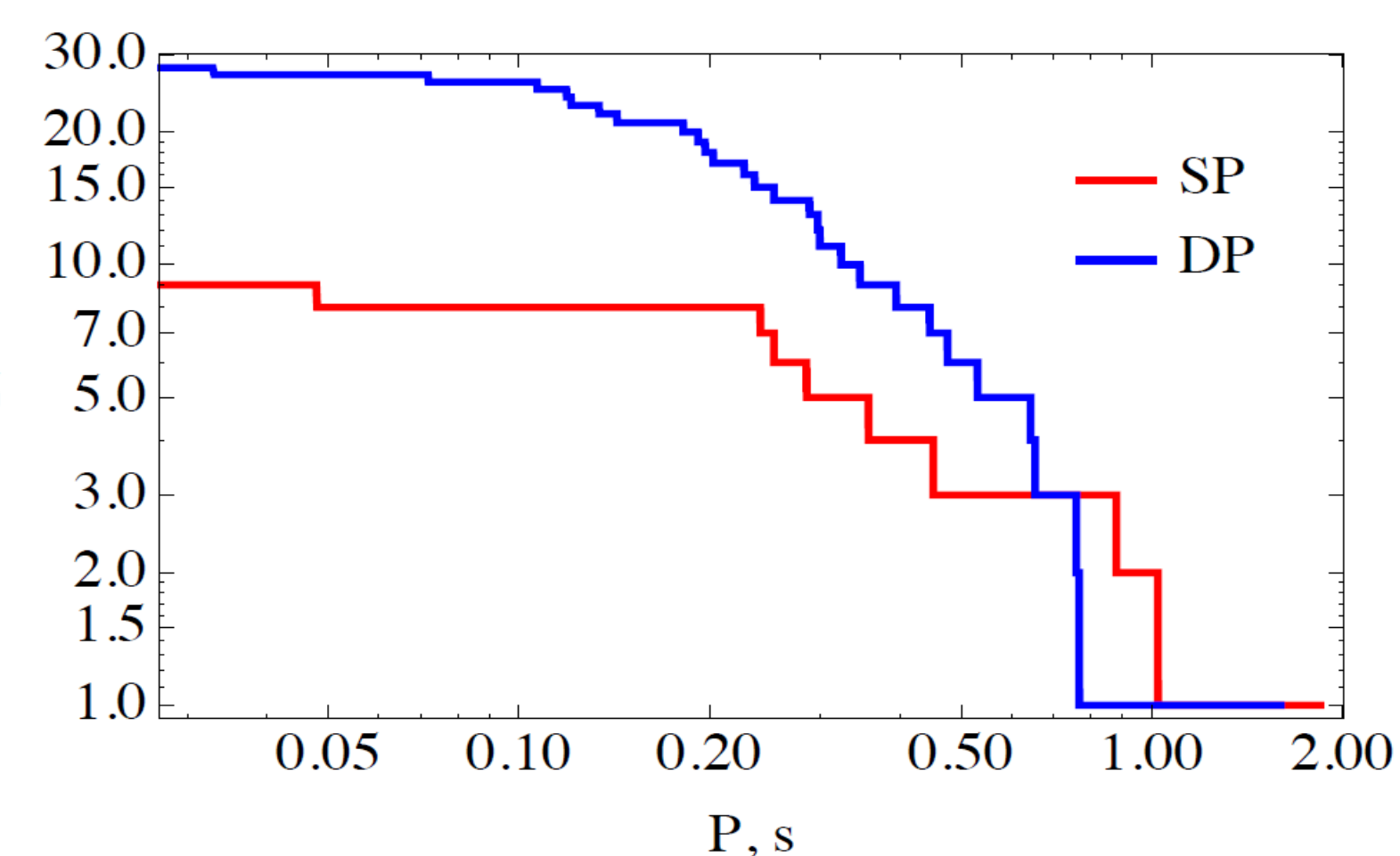


Рис.4. Наблюдаемая функция распределения интеримпульсных пульсаров. Можно легко увидеть наличие степенных хвостов при периодах около 0.5 с.

Сравнение с наблюдениями

Для сравнения с наблюдениями мы рассматривали полученное аналитическое решение и учитывали функцию видимости, связанную с геометрией (см. условия на углы в пунктах про SP и DP пульсары), а также функцию видимости, связанную с конечной чувствительностью приборов. Учет последней дает фактор $1/P$, а также небольшое изменение угловой зависимости, которое можно учесть только в BGI модели (для MHD расчетов модели радиосветимости нет). Ниже представлена таблица с распределением пульсаров по бинам (SP^+ - оценка сверху, SP^- - снизу). Реально наблюдается: SP 6 – 2 – 1.

	0.1 – 0.4 s	0.4 – 0.7 s	0.7 – 1.0 s
SP^+	7	5	4
SP^-	3	2	2
DP	9	9	9
All	580	874	1090

Результаты для MHD модели при равномерной функции распределения по периодам и углам наклона и синусоидальной функции распределения по углам на наблюдателя.

	0.1 – 0.4 s	0.4 – 0.7 s	0.7 – 1.0 s
SP^+	1	0.1	0.1
SP^-	0.2	0.1	0.03
DP	74	38	27
All	580	384	310

Результаты для BGI модели при равномерной функции распределения по периодам и углам наклона и равномерной функции распределения по углам на наблюдателя.

	0.1 – 0.4 s	0.4 – 0.7 s	0.7 – 1.0 s
SP^+	10	4	2
SP^-	5	2	1
DP	57	29	21
All	580	383	309

Результаты для BGI модели при равномерной функции распределения по периодам и углам наклона и равномерной функции распределения по углам на наблюдателя.

Показано, что модель торможения BGI [1], предсказывающая увеличение угла наклона пульсара, при определенных начальных условиях так же хорошо описывает распределение осесимметричных интеримпульсных пульсаров, как и МГД модель [2], хотя резкое спадание числа пульсаров в двух последних группах больше соответствует первой модели. При этом результаты были получены как путем решения кинетического уравнения, так и методом Монте-Карло. Что же касается ортогональных интеримпульсных пульсаров, то их число сильно зависит от (очень плохо определяемой в этом случае) диаграммы направленности. Поэтому их анализ требует дополнительного исследования.

Литература

- [1] Бескин В.С. [и др]. Научная сессия отделения общей физики и астрономии и отделения ядерной физики АН СССР //УФН. Т. 141, вып 3. 1983.
[2] Phillipov A. [et al.]. Time evolution of pulsar obliquity angle from 3D simulations of magnetospheres. arXiv:1311.1513 [astro-ph.HE].
[3] Manchester M. [et al.] // Astrophysical Journal. 129. 19932006 (2005). <http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>