

Статистика интеримпульсных пульсаров – ключ к решению проблемы их эволюции

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

Принстонский Университет
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Московский Физико-Технический Институт



Введение

Спустя почти 50 лет после открытия радиопульсаров вопрос об их эволюции все еще остается открытым. Так, до сих пор не ясно, как меняется угол χ между магнитным моментом нейтронной звезды и ее осью вращения. Имеются как теории, в которых угол наклона приближается к 90° , так и теории, предсказывающие эволюцию к соосному состоянию. В этой работе показано, что интеримпульсные пульсары позволяют определить направление эволюции угла χ , поскольку интеримпульс возникает либо в результате наблюдения противоположных магнитных полюсов (тогда угол близок к 90°), либо в результате наблюдения одного и того же полюса (тогда угол близок к 0°). Поэтому статистические свойства таких пульсаров могут пролить свет и на режим торможения нейтронных звезд.

Статистика интеримпульсных пульсаров

Интеримпульсные пульсары дают нам возможность оценить угол наклона осей χ , т.к. интеримпульс возникает либо в результате наблюдения противоположных полюсов (DP – угол близок к 90°), либо в результате наблюдения одного и того же полюса (SP – угол близок к 0°). Наиболее полные выборки интеримпульсных пульсаров собраны в работах [1]-[2]. Однако, многие пульсары в них отнесены к разным классам. Мы провели собственный анализ, который в целом совпал с результатами работы [1]. В Табл. 1 пульсары рассортированы по четырем бинам в предположении, что все неопределенные пульсары принадлежат данному классу. А в Табл. 2-3 мы отдельно выделили строчку с теми SP пульсарами, для которых в определении класса у нас нет сомнений. Мы видим, что в любом случае большинство интеримпульсных пульсаров имеют малые периоды P , т.е. они достаточно молодые. Поэтому мы в дальнейшем не будем обсуждать эволюцию магнитного поля.

	0.1-0.4с	0.4-0.7с	0.7-1с	>1с
DP	22	6	2	2
SP	15	2	2	2

Табл. 1. Распределение интеримпульсных пульсаров по периодам P .

Однополюсные интеримпульсные пульсары

Для соосных интеримпульсных пульсаров можно сделать простую оценку угла наклона осей χ . При малых углах χ диаграмма направленности и траектория линии зрения приблизительно лежат в одной плоскости, так что угол χ 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 возникн $|\chi + \xi| \leq W_0/\sqrt{P}$ теримпульса необходимо, чтобы $\eta = 2\pi$. Это соответствует условию и является оценкой снизу для угал наклона. Истинный угол лежит между значениями, полученными этими способами.

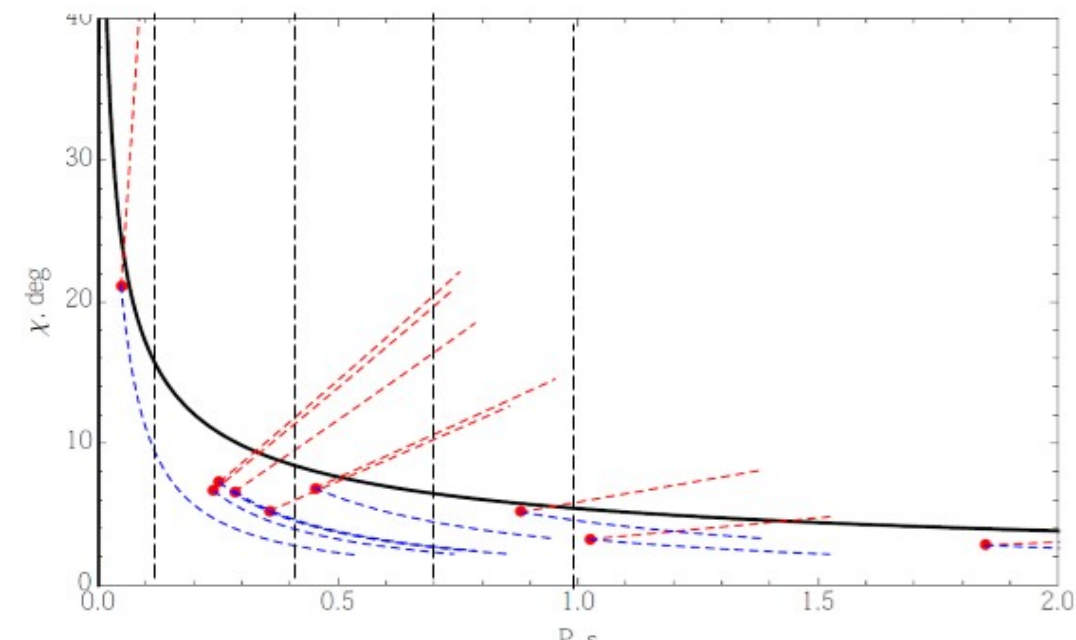


Рис.1. На графике показаны наблюдаемые SP пульсары, распределенные по периодам и дальнейшая эволюция углов полярной оси. Красным обозначена эволюция пульсаров согласно модели BGI (угол эволюционирует к 90° градусам), синим — согласно МГД модели (к 0° градусам).

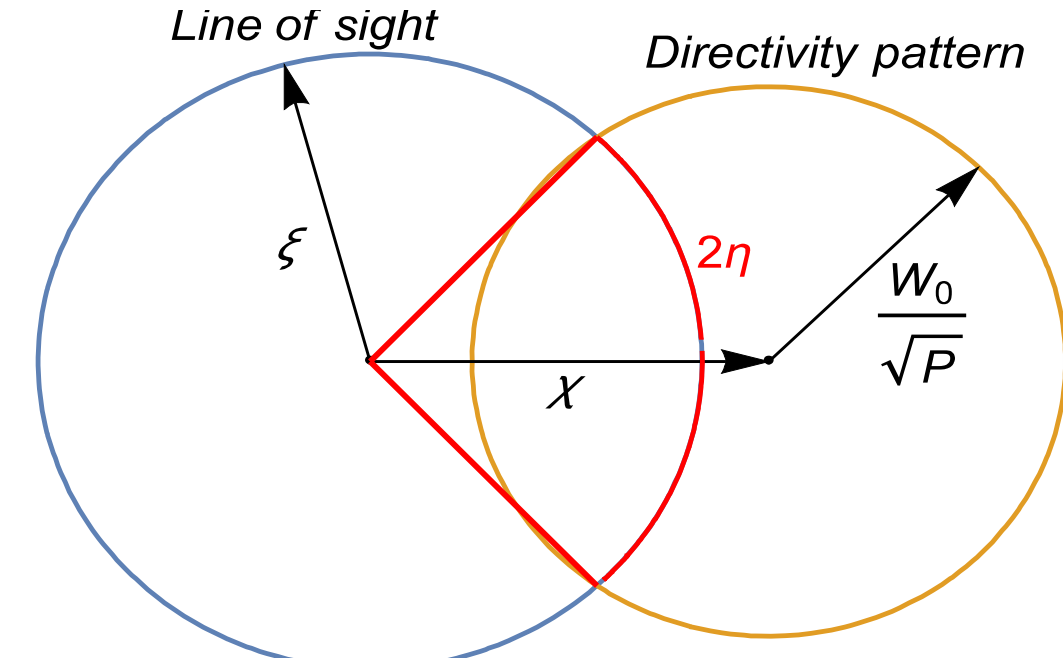


Рис.2. График, показывающий пересечение диаграммы направленности (оранжевая линия) с лучом зрения (синяя линия). Если излучение возникает на границе диаграммы направленности, то расстояние между импульсом и интеримпульсом равно 2η . По результатам его наблюдений можно определить верхнюю границу угла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

	0.1-0.4 с	0.4-0.7 с	0.7-1 с	>1 с
SP	5	-	1	1
SP (все)	15	2	2	2
BGI (MC)	12	2	1	1
BGI (KE)	10	4	2	0
MHD (MC)	9	7	6	5
MHD (KE)	7	5	4	3

Табл. 2. Сравнение результатов, полученных путем решения кинетического уравнения (KE) и Монте-Карло симуляций (MC) для SP пульсаров и равномерного начального распределения по углу $Q_\chi = 2/\pi$.

	0.1-0.4 с	0.4-0.7 с	0.7-1 с	>1 с
SP	5	-	1	1
SP(все)	15	2	2	2
BGI (KE)	1	0	0	0
MHD (KE)	7	5	4	3

Табл. 3. Сравнение результатов, полученных путем решения кинетического уравнения (KE) для SP пульсаров и для случайного начального распределения по углу $Q_\chi = \sin \chi$.

Выводы

Показано, что модель торможения BGI [1], предсказывающая увеличение угла наклона пульсара, для однородной функции рождения по начальным углам наклона также хорошо описывает распределение осесимметричных интеримпульсных пульсаров SP, как и МГД модель [2], хотя резкое спадание числа пульсаров в двух последних бинах больше соответствует первой модели. С другой стороны, модель случайной ориентации противоречит обоим моделям эволюции. Что же касается ортогональных интеримпульсных пульсаров DP, то их число сильно зависит от (очень плохо определяемой в этом случае) диаграммы направленности (см. Рис. 8). Поэтому их анализ требует дополнительного исследования.

Двухполюсные интеримпульсные пульсары

Для DP пульсаров ситуация усложняется отсутствием модели диаграммы направленности при углах наклона χ , близких к 90° градусам. В этом случае линия нулевой гольдрайховской плотности пересекает диаграмму, поэтому число DP пульсаров должно быть меньше простейшей оценки $|180 - \chi - \eta|_{DP} \leq W_0/\sqrt{P}$. Поэтому в этой работе будут рассмотрены лишь соосные интеримпульсные пульсары.

Кинетическое уравнение

Распределение радиопульсаров по углу наклона осей χ (от которого зависит число интеримпульсных пульсаров) может быть определена из решения кинетического уравнения

$$\frac{\partial}{\partial P}(\dot{P} N) + \frac{\partial}{\partial \chi}(\dot{\chi} N) = Q$$

где функция рождения Q зависит от угла наклона χ и начального периода P . В этой работе мы рассматриваем две модели эволюции, а именно BGI модель [3], которая предсказывает увеличение угла наклона χ , так и МГД модель [4], в которой угол эволюционирует к 0° градусам. В рамках этих моделей законы эволюции задаются следующими уравнениями

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

Здесь представлены также интегралы движения I , благодаря которым кинетическое уравнение может быть легко проинтегрировано. Далее, для функции распределения по начальным углам были рассмотрены две модели, а именно модель случайной ориентации магнитной оси относительно оси вращения $Q_\chi = \sin \chi$, а также равномерное распределение $Q_\chi = 2/\pi$. В результате, для BGI- модели функции распределения в этих двух случаях имеют вид

$$N(P, \chi) = k \frac{\chi - \sin \chi \cos \chi}{\sin^2 \chi \cos^{2d-1} \chi} P Q_P \quad N(P, \chi) = k \frac{1 - \cos \chi}{\sin^2 \chi \cos^{2d-1} \chi} P Q_P$$

Соответственно, для МГД модели имеем

$$N(P, \chi) = k \frac{\frac{\pi}{2} - \chi - \sin \chi \cos \chi}{\cos^3 \chi} P^2 Q_P \quad N(P, \chi) = k \frac{\frac{1}{2} \ln \frac{1+\cos \chi}{1-\cos \chi} - \cos \chi}{\cos^3 \chi} P^2 Q_P$$

Считая теперь для простоты, что функция рождения Q_p по начальным периодам равномерна, т.е. $Q_p \sim \text{const}$ (что по-видимому можно считать справедливым для пульсаров с малыми периодами), можно оценить число SP интеримпульсных пульсаров. Как показано в Табл. 2, для равномерного распределения по начальным углам полное число соосных интеримпульсных пульсаров находятся в хорошем согласии с данными наблюдений. Другой стороны, модель случайной ориентации противоречит обоим моделям эволюции (см. Табл. 3).

Сравнение с наблюдениями

Для более детального сравнения предсказаний теории с данными наблюдений мы рассмотрели полученные выше аналитические решения, а также учитывали как функцию видимости, связанную как с геометрическим фактором (наблюдатель должен попадать в диаграмму направленности, см. условия на углы в пунктах про SP и DP пульсары), так и функцию видимости, связанную с конечной чувствительностью приборов (мы не видим слабых далеких объектов). Предсказания теории сведены в Табл. 2. Как мы видим, наблюдаемое резкое спадание числа пульсаров в трех последних бинах лучше соответствует модели BGI. Как показано на Рис. 1, так и должно быть, поскольку в этой модели пульсары при увеличении периода покидают область интеримпульсных пульсаров (красные штриховые линии), тогда как в модели MHD (синие линии) все пульсары, родившиеся в области SP-интеримпульсных пульсаров, остаются в этой области и в дальнейшем. Этот вывод согласуется с результатами, полученным нами методом Монте-Карло. Ниже представлены и другие рисунки, показывающие согласованность MC симуляций и решений кинетического уравнения.

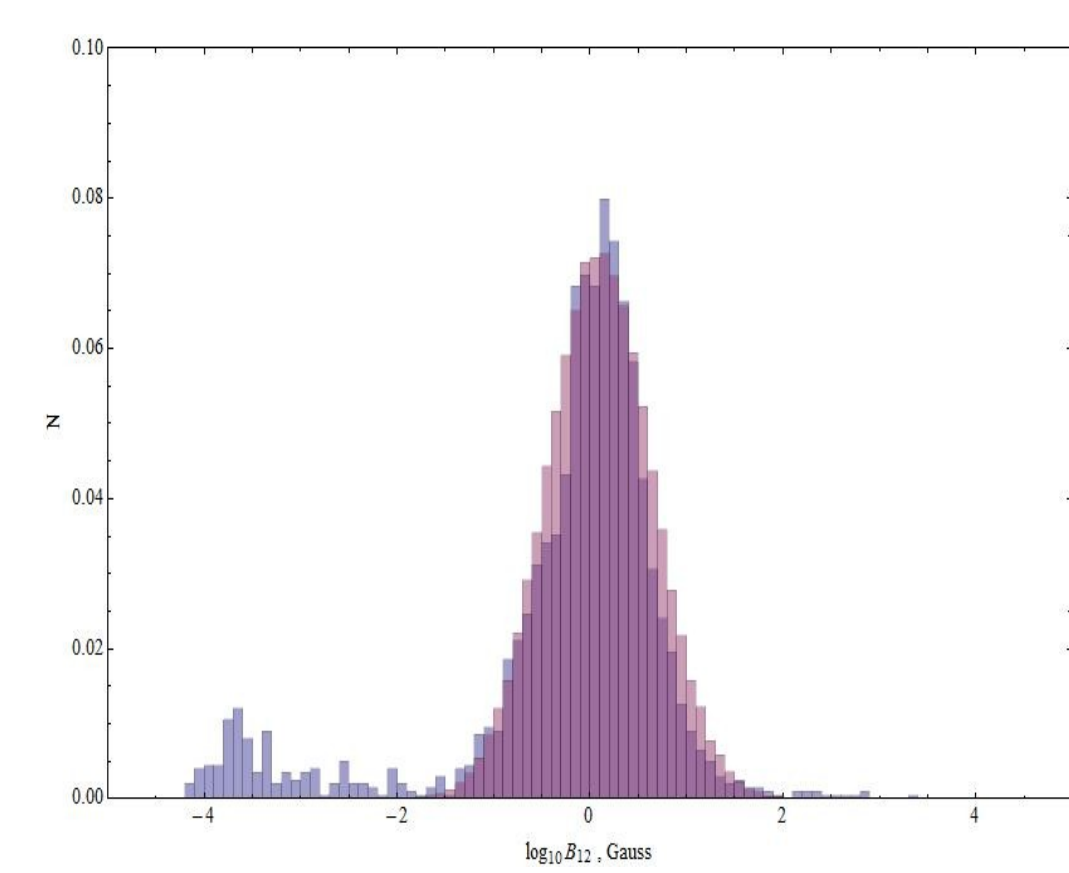


Рис.3. Сгенерированные магнитные поля (фиолетовый) и наблюдаемые магнитные поля (синий). В этом случае наблюдается хорошее совпадение с наблюдаемыми данными

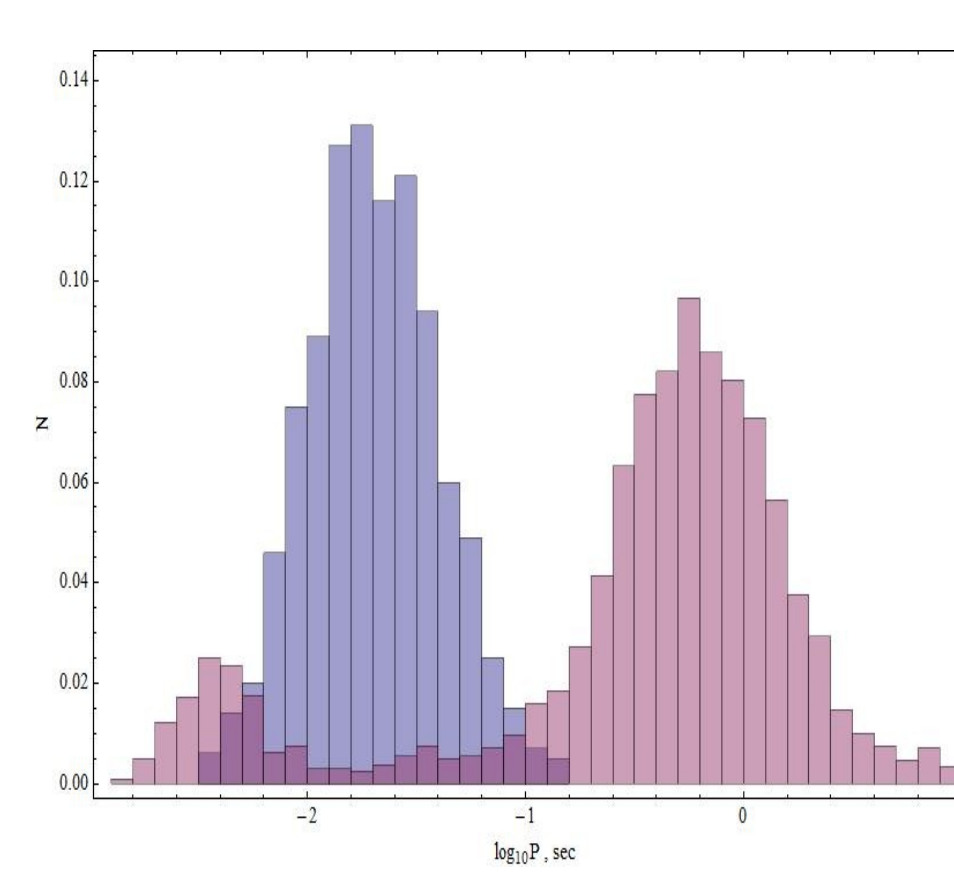


Рис.4. На этом рисунке изображены начальные периоды пульсаров по модели BGI. Синим цветом помечены периоды начального распределения, фиолетовым - наблюдаемые

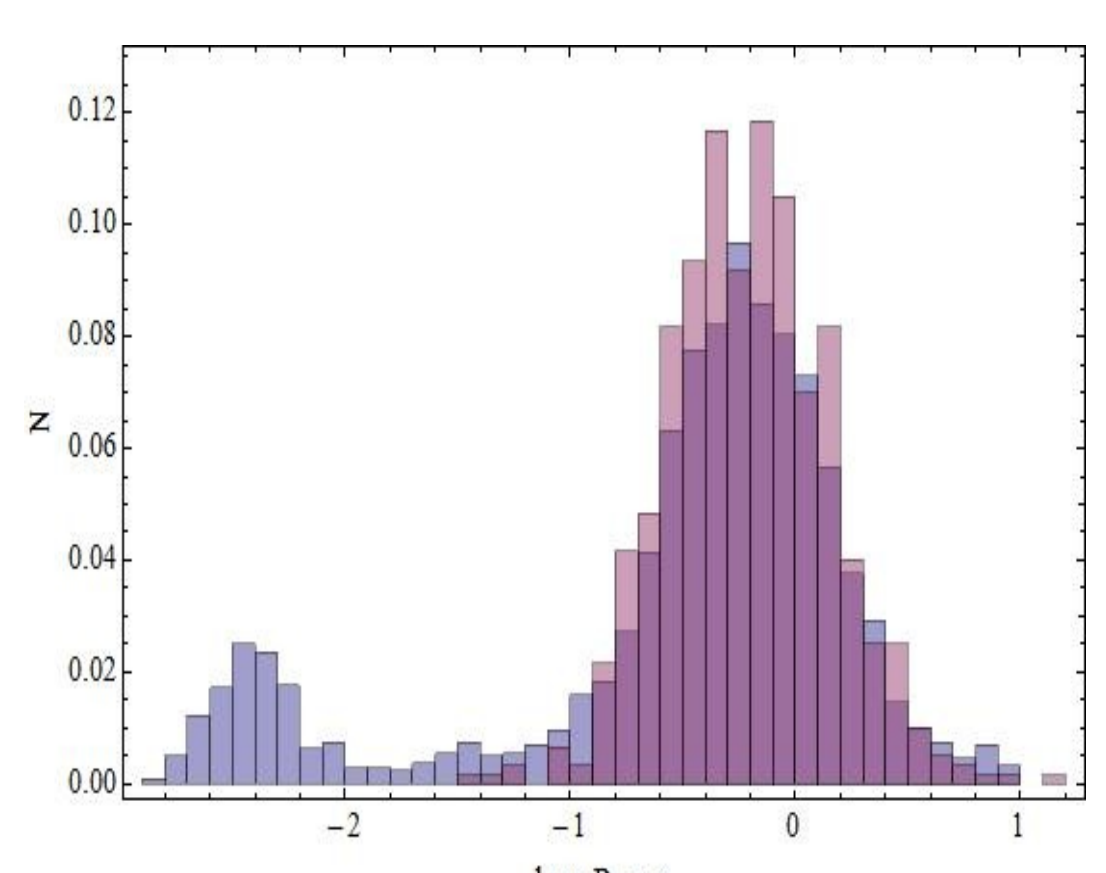


Рис.5. На этом рисунке изображены периоды проэволюционированных пульсаров по модели BGI. Как видно на рисунке, наблюдается хорошее совпадение с данными наблюдений (каталог ATNF).

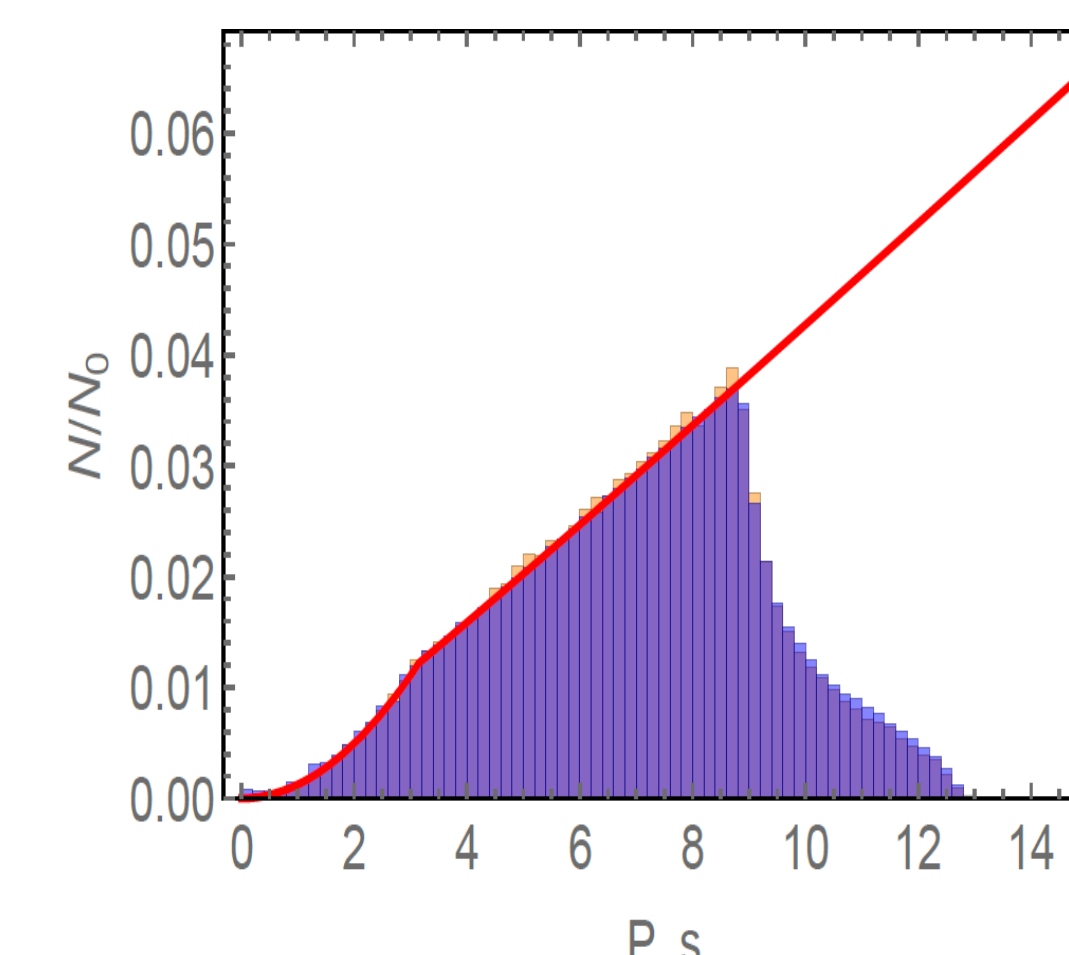


Рис. 6. Сравнение Монте-Карло симуляций (фиолетовый) с аналитическим решением (красный). Большое отличие при больших периодах связано с конечным временем интегрирования.

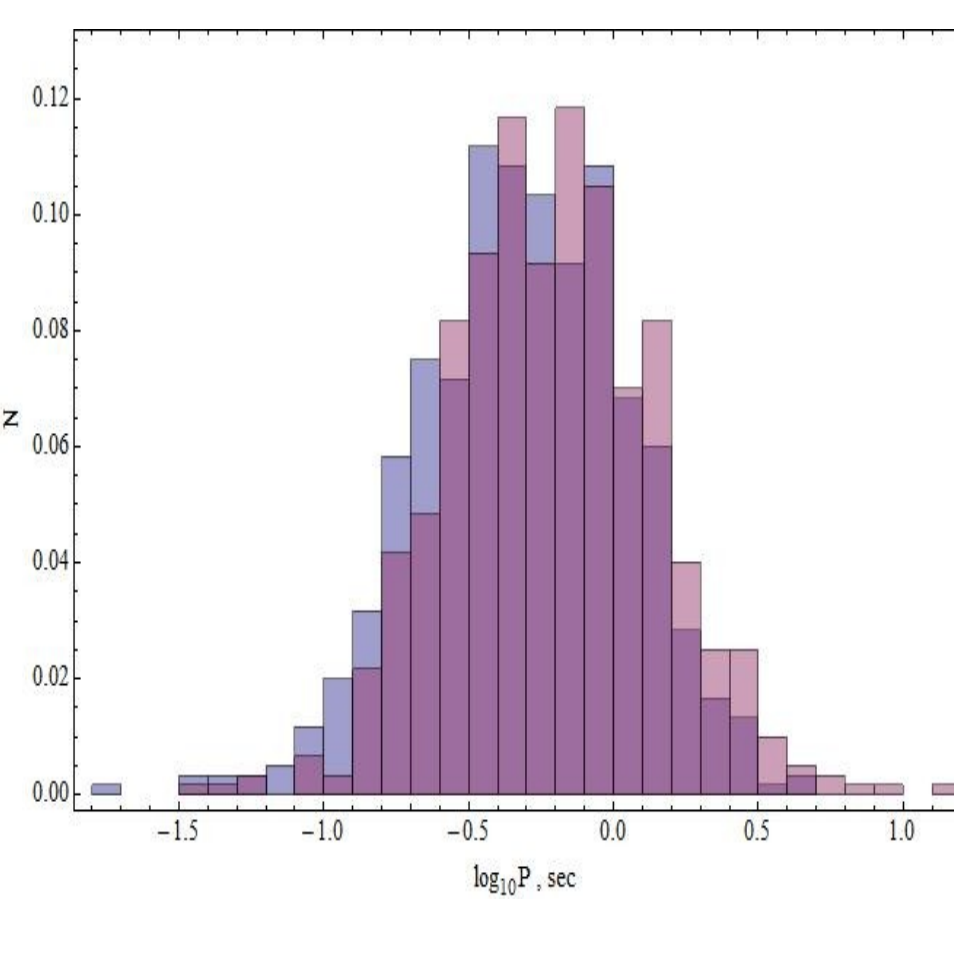


Рис. 7. Сравнение начальных распределений по периодам для моделей МГД (синий) и BGI (фиолетовый)

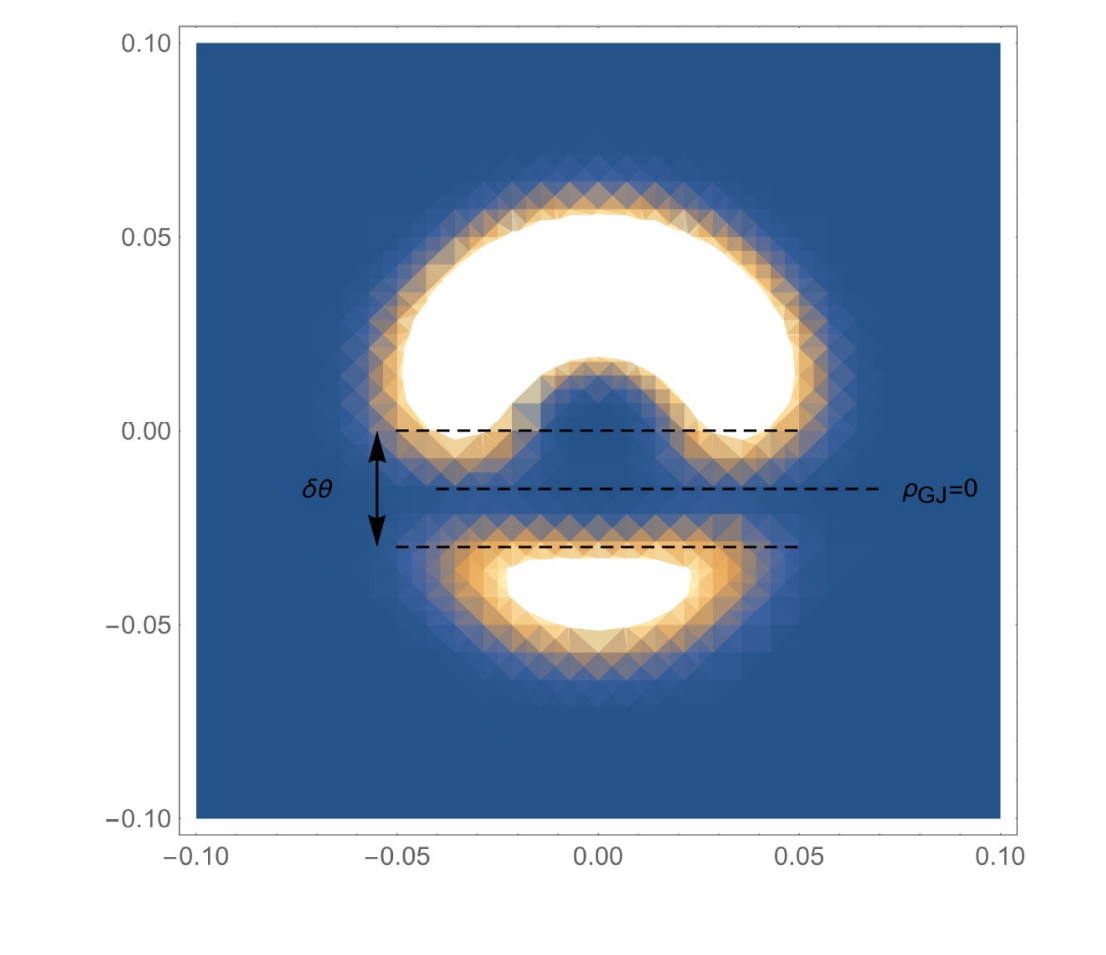


Рис 8. Полярная шапка для почти ортогонального ротатора. Генерация вторичной плазмы невозможна ни вблизи магнитного полюса, ни вблизи линии, где гольдрайховская плотность обращается в ноль [5].

Литература

- [1] Maciesiak K., GilJ., Ribero V.A.R.M.. MNRAS, 414, 1314 (2011)
- [2] Малов И.Ф., Никитина Е.Б. АЖ, 88, 954 (2011)
- [3] Beskin V.S., Gurevich A.V., Istomin Ya.N. Physics of the pulsar magnetosphere. (Cambridge University Press, Cambridge 1993)
- [4] Philippov A., Tchekhovskoy A., Li J.G., MNRAS, 441, 1879 (2014)
- [5] Beskin V.S., Hakobian H.L. MNRAS (in preparation)