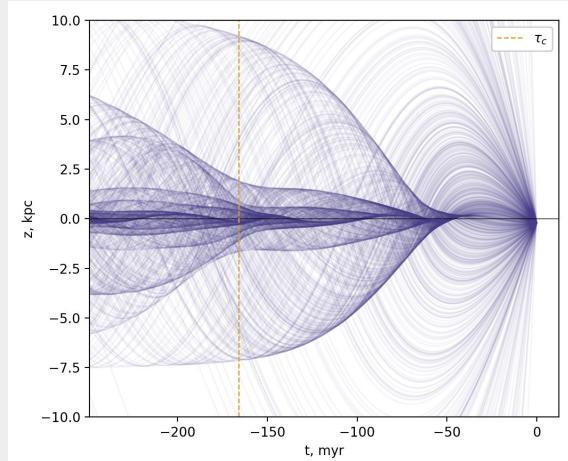


Бимодальность кика радиопульсаров и ее связь с другими параметрами

Антон Лазарев, Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)

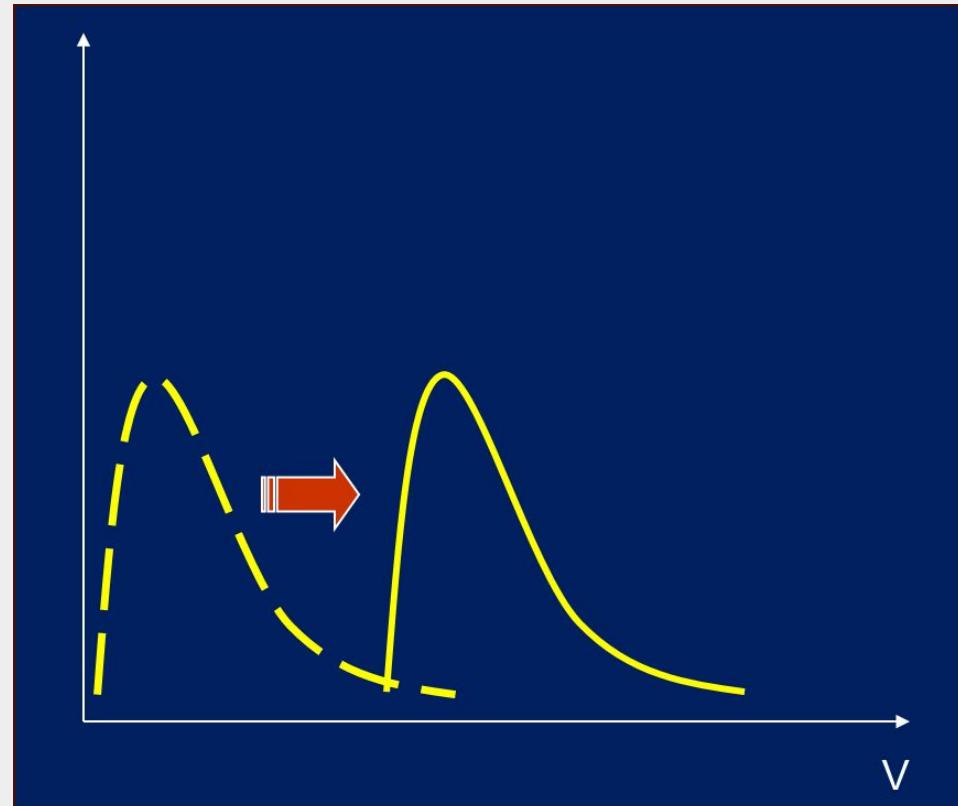


Скорости нейтронных звезд

Практически сразу после открытия стало ясно, что радиопульсары имеют пространственные скорости, которые существенно превосходят скорости их прародителей - массивных звезд.

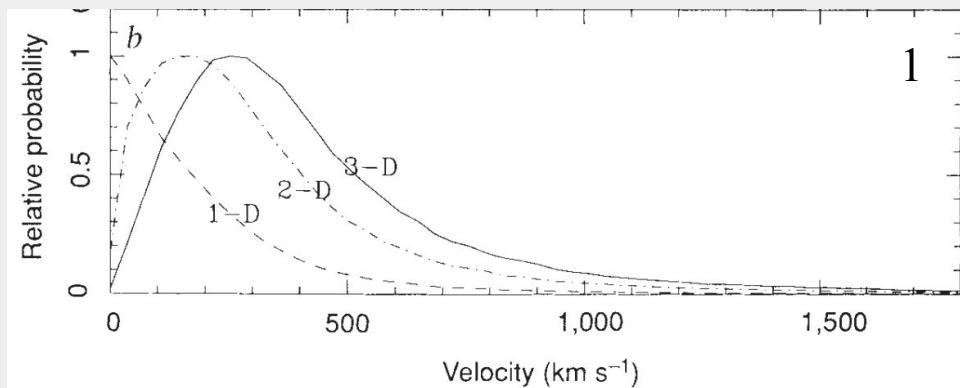
Уже в 1970 г. начали рассматривать модели, объясняющие высокие пространственные скорости радиопульсаров (Шкловский, Gott et al.. Gunn and Ostriker).

См. обзор в arXiv:2509.01430

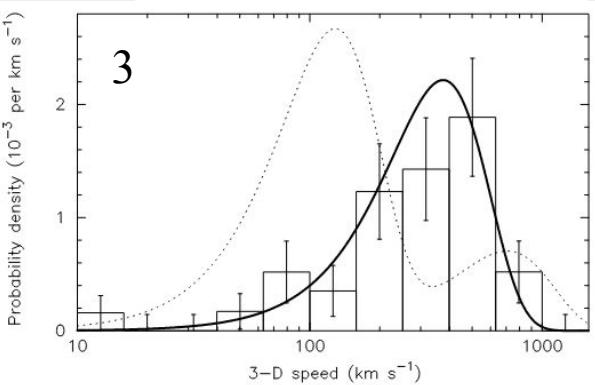


Различные модели распределения скорости кика

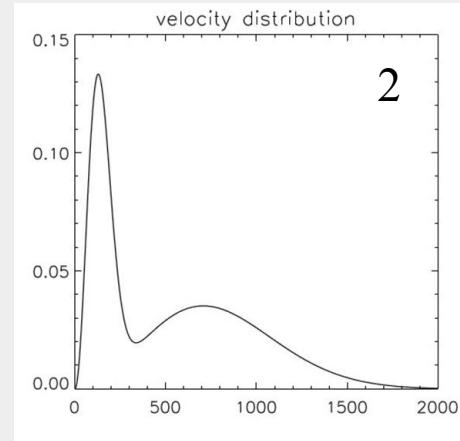
- (1) Lyne и Lorimer, 1994 - анализ собственных движений с использованием модели Галактической электронной плотности (Taylor и Cordes, 1993):
Распределение киков со средней скоростью 450 ± 90 km/s.
- (2) Arzoumanian et al., 2002 - детальный популяционный синтез:
Бимодальное распределение с $\sigma_{v1} = 90$ km/s and $\sigma_{v2} = 450$ km/s.
- (3) Hobbs et al., 2005 - анализ собственных движений пульсаров с возрастом < 3 млн лет.
Максвелловское распределение с $\sigma \approx 265$ km/s.



1



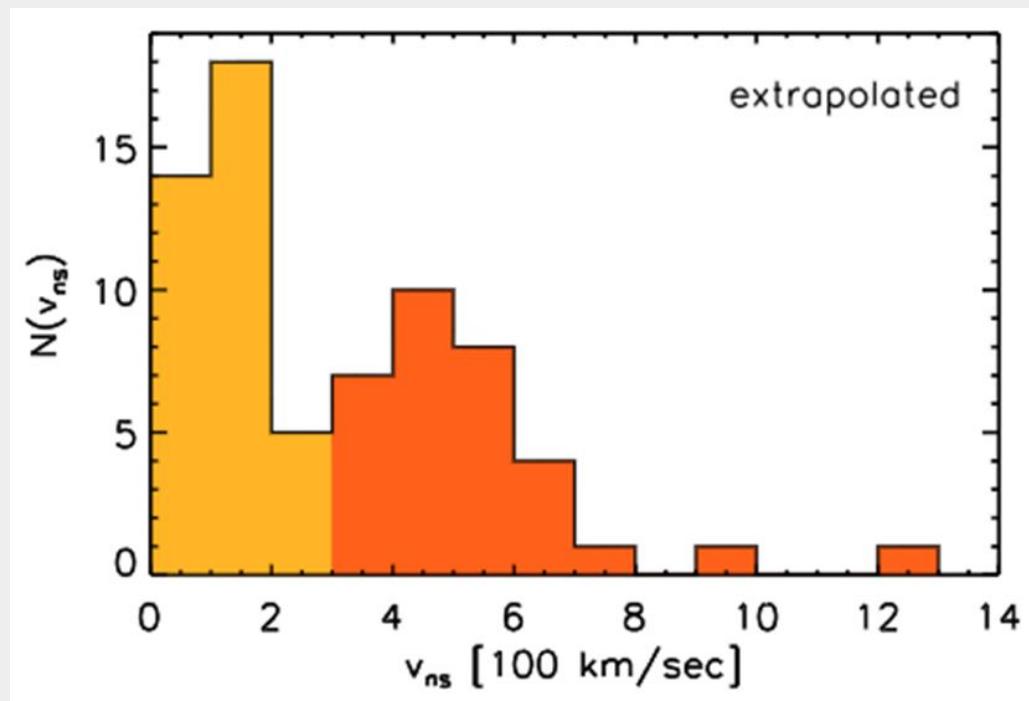
3



2

Теоретические модели

Численное моделирование взрывов сверхновой в принципе позволяет воспроизвести бимодальность кика. Поскольку бимодальность связана с различиями в существенных деталях развития взрыва, можно предположить, что это приведет к отличающимся параметрам компактных объектов, относящихся к первой (низкоскоростной) и второй модам.



Scheck et al. 2006

Бимодальное распределение - Игошев, 2020

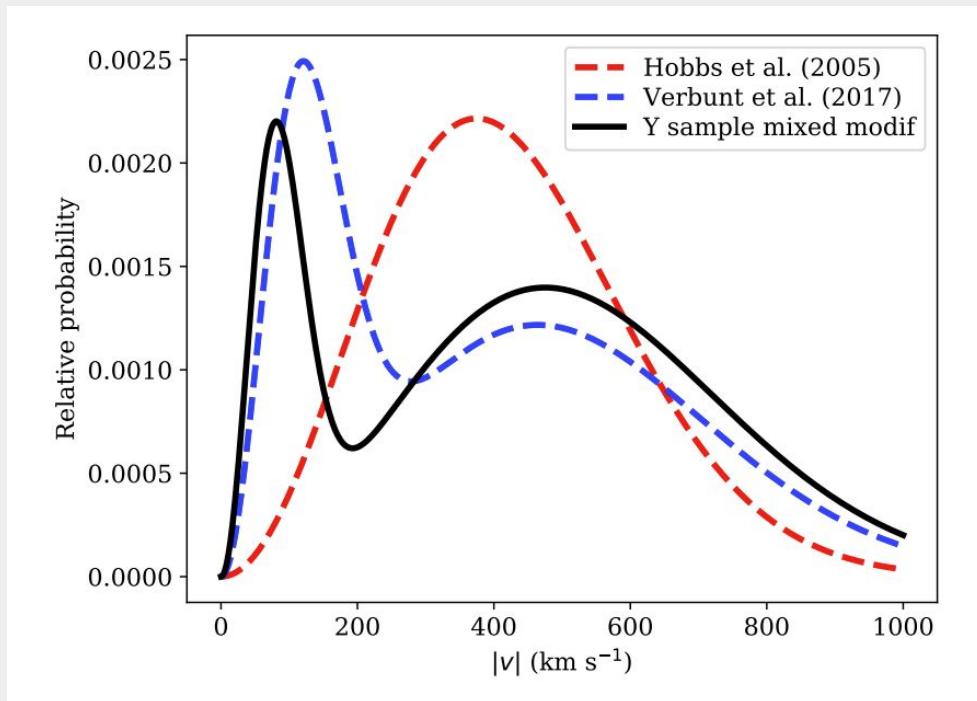
Распределение начальной скорости
пульсаров с возрастом < 3 млн. лет

$$f_{v,2\text{mix}}(\vec{v}|w, \sigma_1, \sigma_2) dv = w f_{v,\text{mix}}(\vec{v}|\sigma_1) + (1-w) f_{v,\text{mix}}(\vec{v}|\sigma_2) dv$$

1 мода: $\sigma_1 = 56^{+25}_{-15} \text{ km s}^{-1}$

2 мода: $\sigma_2 = 298 \pm 28 \text{ km s}^{-1}$

Вес 1й моды: $w = 20^{+11}_{-10} \text{ per cent}$



См. также Igoshev et al. (2021)

Метод моделирования. Общая схема.

Нашей задачей является исследования различных параметров пульсаров, относящихся к первой (низкоскоростной) и второй (высокоскоростной) модах распределения по величине кика.

Для этого необходимо для каждого пульсара определить, к какой моде он относится.

Для всей выборки пульсаров

Сравнить параметры пульсаров, относящихся к разным модам.

Для каждого пульсара из выборки

Получить скорость в картинной плоскости по данным собственных движений

Разыграть лучевую скорость 1000 раз

Проинтегрировать орбиты назад в галактическом потенциале

Найти киковую скорость пульсара в предполагаемых местах рождения

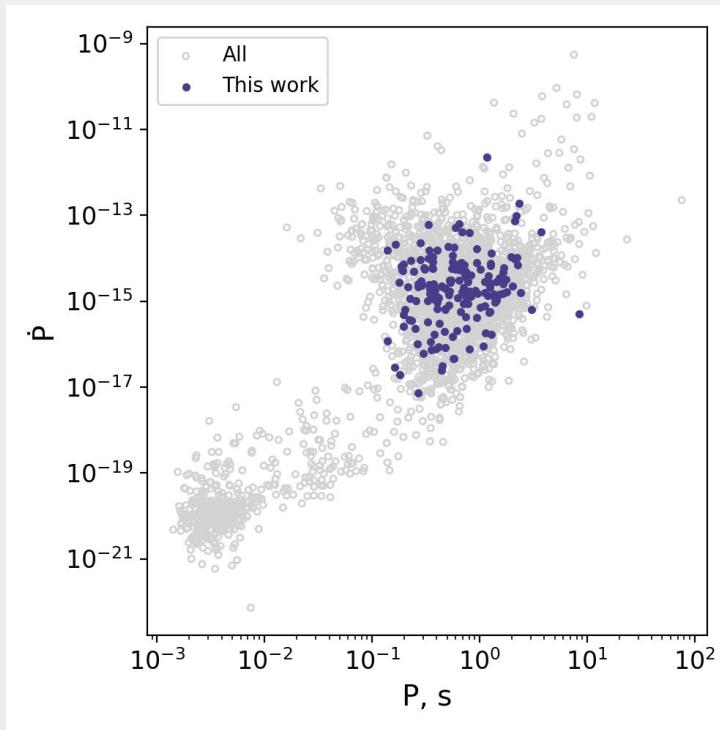
Определить к какой моде распределения относится пульсар

Выборка радиопульсаров

Выборка пульсаров из ATNF Pulsar Catalogue v2.7.0:

1. Известен $\tau_c = 1/2 \cdot P/\dot{P}$
2. Лучшая оценка расстояния $D < 10$ кпк.
3. Измерены собственные движения.
4. $\dot{P} > 5 \cdot 10^{-18}$, - исключены миллисекундные пульсары.
5. Исключены пульсары в двойных системах и в шаровых скоплениях.
6. Исключены SGR, AXP и XINS.
7. Исключены с ассоциацией с остатком сверхновых.
8. Исключены GRS и XRS.

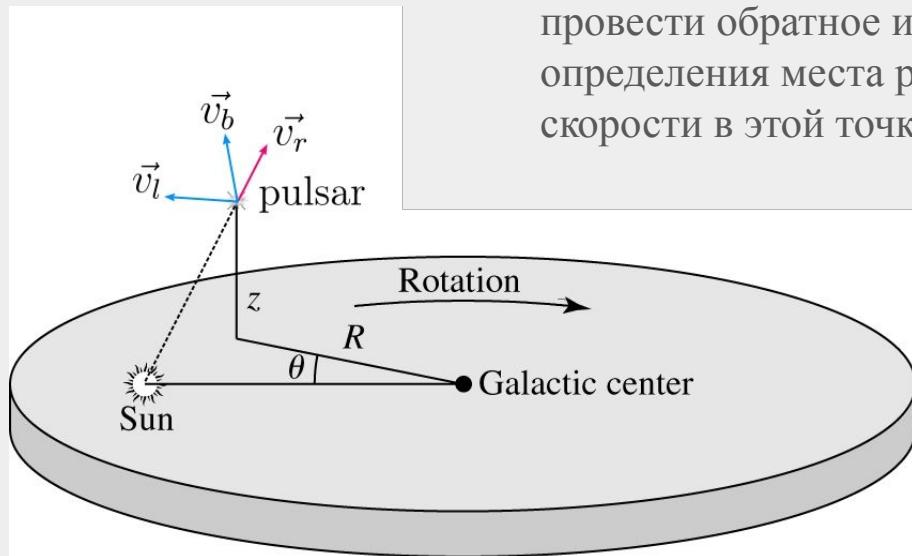
Всего - 176 пульсаров.



Метод моделирования. Современная 3D скорость

Наблюдения позволяют определить лишь две компоненты скорости - скорость в картинной плоскости.

Для определения кика нам необходимо задать все три, чтобы провести обратное интегрирование траектории с целью определения места рождения пульсара и полного вектора скорости в этой точке.



Метод моделирования. Разыгрывание лучевой скорости

Лучевая скорость пульсара является неизвестной компонентой 3D скорости.

Из предположения об изотропной ориентации вектора скорости относительно локального стандарта покоя, значение $\cos(\theta)$ выбирается 1000 раз равномерно от -1 до 1 и из этого значения вычисляется лучевая скорость пульсара.

$$v_l = 4.74 D \mu_l \cos b + v_{\odot, l}$$

$$v_b = 4.74 D \mu_b + v_{\odot, b}$$

$$\vec{v}_t = (v_l, v_b, 0)$$

$$\vec{v}_{\text{LSR}} = \vec{v}_{\text{circular}} (R_{\text{Galactocentric}})$$

$$v_r = \|\vec{v}_t - \vec{v}_{\text{LSR}, t}\| \cot \theta + v_{\text{LSR}, r}$$

$$\cos \theta \in \text{Uniform}(-1; 1)$$

Gaspari et al., 2024

$$\vec{v}_{\text{LSR}, t} \text{ и } v_{\text{LSR}, r}$$

- трансверсальная и лучевая компоненты скорости локального стандарта покоя

- трансверсальная скорость пульсара плюс проекция скорости Солнца на картинную плоскость

$$\vec{v}_t$$

Метод моделирования. Разыгрывание лучевой скорости

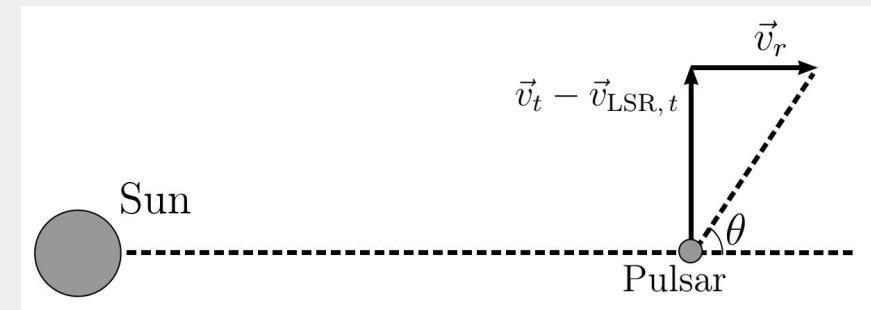
Лучевая скорость пульсара является неизвестной компонентой 3D скорости.

Из предположения об изотропной ориентации вектора скорости относительно локального стандарта покоя, значение $\cos(\theta)$ выбирается 1000 раз равномерно от -1 до 1 и из этого значения вычисляется лучевая скорость пульсара.

$\vec{v}_{\text{LSR}, t}$ и $v_{\text{LSR}, r}$

\vec{v}_t

- трансверсальная и лучевая компоненты скорости локального стандарта покоя
- трансверсальная скорость пульсара плюс проекция скорости Солнца на картинную плоскость



$$v_r = \|\vec{v}_t - \vec{v}_{\text{LSR}, t}\| \cot \theta + v_{\text{LSR}, r}$$

$$\cos \theta \in \text{Uniform}(-1; 1)$$

Gaspari et al., 2024

Метод моделирования. Разыгрывание лучевой скорости

Лучевая скорость пульсара является неизвестной компонентой 3D скорости.

Из предположения об изотропной ориентации вектора скорости относительно локального стандарта покоя, значение $\cos(\theta)$ выбирается 1000 раз равномерно от -1 до 1 и из этого значения вычисляется лучевая скорость пульсара.

$$v_l = 4.74 D \mu_l \cos b + v_{\odot, l}$$

$$v_b = 4.74 D \mu_b + v_{\odot, b}$$

$$\vec{v}_t = (v_l, v_b, 0)$$

$$\vec{v}_{\text{LSR}} = \vec{v}_{\text{circular}} (R_{\text{Galactocentric}})$$

$$v_r = \|\vec{v}_t - \vec{v}_{\text{LSR}, t}\| \cot \theta + v_{\text{LSR}, r}$$

$$\cos \theta \in \text{Uniform}(-1; 1)$$

Gaspari et al., 2024

$$\vec{v}_{\text{LSR}, t} \text{ и } v_{\text{LSR}, r}$$

$$\vec{v}_t$$

- трансверсальная и лучевая компоненты скорости локального стандарта покоя

- трансверсальная скорость пульсара плюс проекция скорости Солнца на картинную плоскость

Метод моделирования. Современная 3D скорость

Известная трансверсальная
компоненты скорости

$$v_l = 4.74 D \mu_l \cos b + v_{\odot, l}$$

$$v_b = 4.74 D \mu_b + v_{\odot, b}$$

$$\vec{v}_t = (v_l, v_b, 0)$$

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_l \\ v_b \\ v_r \end{pmatrix}$$

Разыгранная 1000 раз
лучевая компонента
скорости

$$v_r = \|\vec{v}_t - \vec{v}_{\text{LSR}, t}\| \cot \theta + v_{\text{LSR}, r}$$

$$\cos \theta \in \text{Uniform}(-1; 1)$$

Галактоцентрические
координаты пульсара

$$R = \sqrt{R_{\odot}^2 + (D \cos b)^2 - 2R_{\odot} \cos b \cos l}$$

$$\phi = \arccos \left(R^2 + R_{\odot}^2 - \frac{D^2 \cos^2 b}{2RR_{\odot}} \right)$$

$$z = D \sin b$$

Метод моделирования. Интегрирование траектории

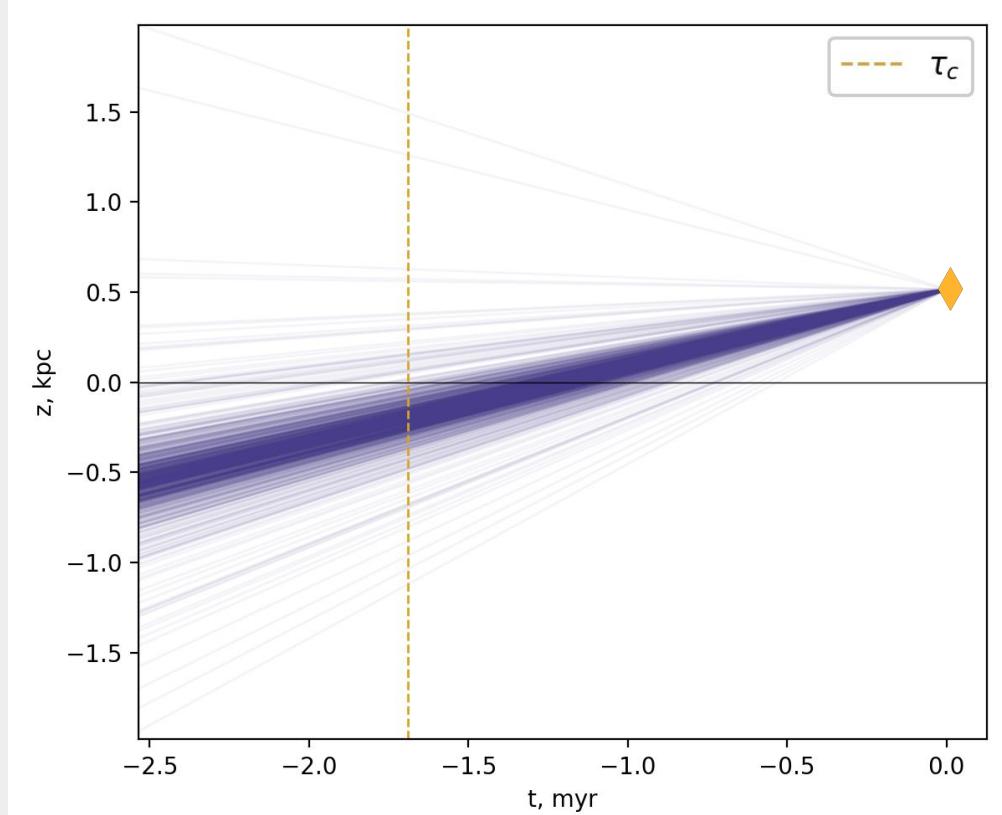
Для каждого пульсара:

1. Вычисляются координаты в Галактоцентрической системе отсчета.
2. Значение лучевой скорости разыгрывается $n = 1000$ раз.
3. Для каждого значения лучевой скорости вычисляется 3D скорость в Галактоцентрической системе координат.
4. В потенциале **McMillan17** (McMillan, 2017) орбиты интегрируются назад до $t_{\max} = 1.5 \tau_c$
5. Вычисляются скорости пульсара относительно круговой скорости в Галактике для каждой траектории.

Пример вычисления траекторий для PSR B0402+61. График $z(t)$. Современный момент времени - справа.

Каждая кривая отвечает своему значению лучевой скорости.

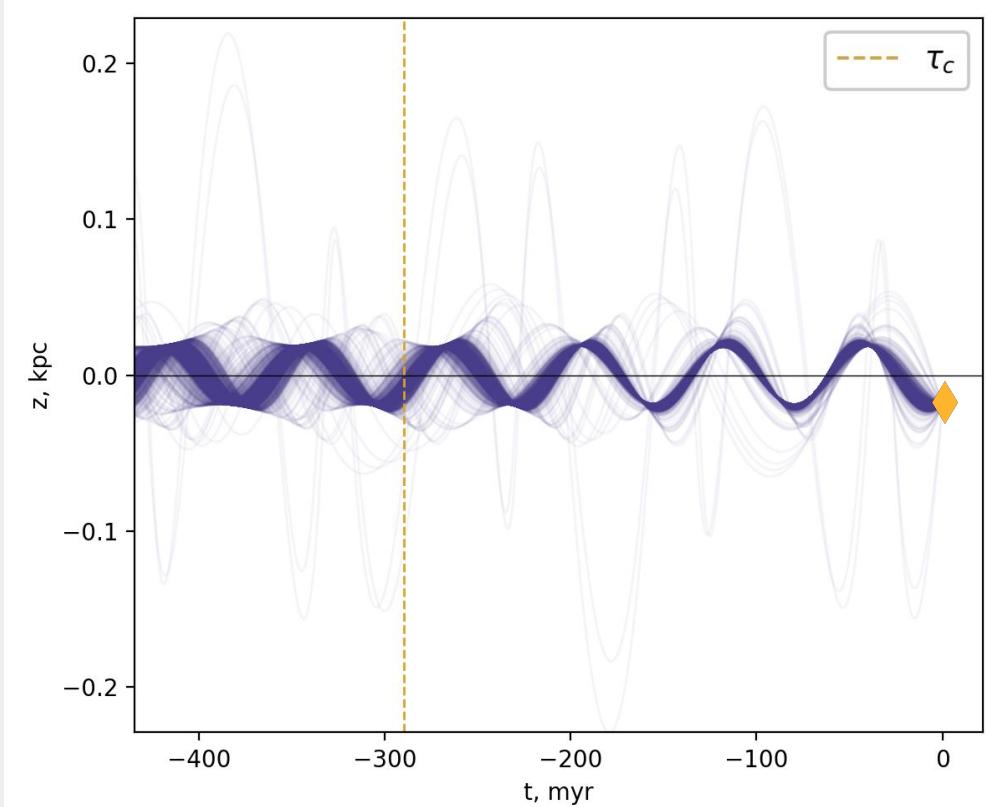
Центр ‘конуса’ соответствует среднему значению лучевой скорости, то есть нулевой лучевой скорости относительно локального стандарта покоя.



Пример вычисления траекторий для PSR B1944+17. График $z(t)$. Современный момент времени- справа.

Видно, как пульсар совершает колебания относительно галактического диска.

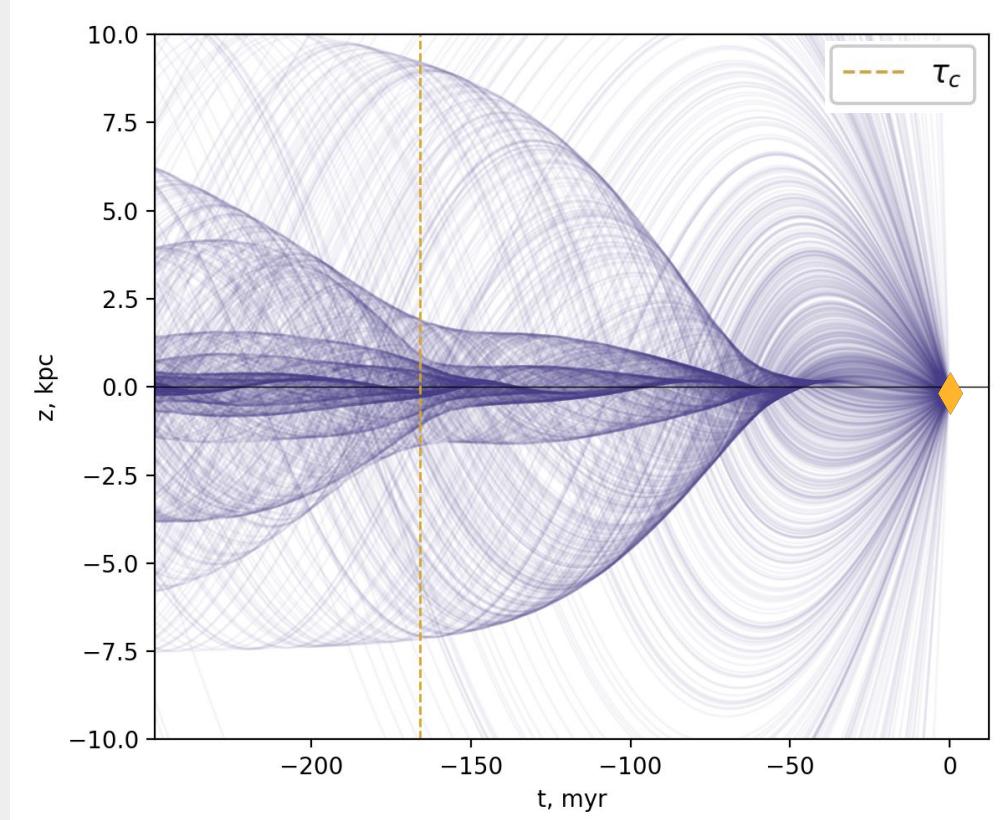
Каждое пересечение галактического диска является возможным местом рождения пульсара.



Пример вычисления траекторий для PSR J0108-1431. График $z(t)$.
Современный момент времени - справа.

Траектории этого пульсара сильно зависят от значения лучевой скорости.

Место рождения пульсара становится крайне неопределённым.



Место рождения пульсара

Величина χ рассчитывается для определенного в расчетах места рождения.

Местом рождения каждой траектории пульсара считается либо:

- Плоскость галактического диска - пересечение диска траекторией.
- Точка $t = -\tau_c$ - основанное на характеристическом возрасте возможное место рождения пульсара. Это позволяет учесть траектории пульсаров, которые не пересекают галактический диск на интервале интегрирования.
- Точка $t = 0$ - на случай, если пересечение диска отсутствует, а в точке $t = -\tau_c$ пульсар находится далеко от галактического диска.

В неоднозначных случаях все места учитываются при дальнейшем анализе.

Величина кика

Считая, что звезда прародитель пульсара находилась на круговой траектории в Галактике, величина кика равна его скорости минус круговая скорость в месте рождения.

$$\vec{v}_{\text{birth}} = \begin{pmatrix} v_R(t_0) \\ v_\phi(t_0) - v_{\text{circular}}(R(t_0)) \\ v_z(t_0) \end{pmatrix}$$

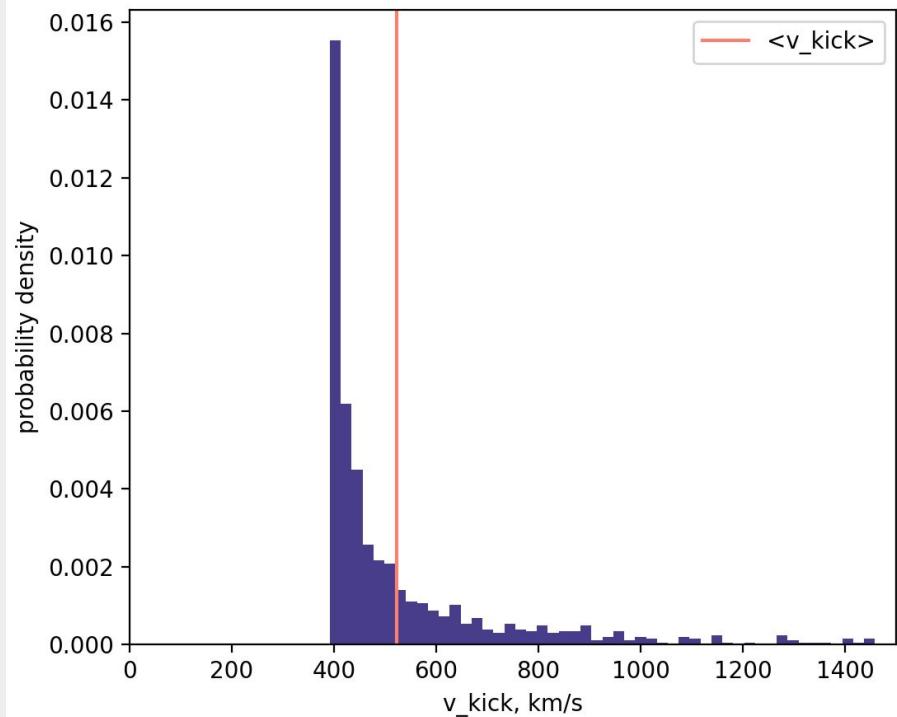
$$v_{\text{kick}} = \|\vec{v}_{\text{birth}}\|$$

Такое предположение вносит неопределенность в малые скорости из-за недоучета скорости прародителя и возможной дополнительной скорости, связанной с распадом двойной системы.

Распределение начальной скорости PSR B0154+61 в месте первого пересечения диска Галактики.

Наименьшее значение киковой скорости (пик на гистограмме) соответствует нулевой лучевой скорости относительно локального стандарта покоя.

Вертикальной линией отмечена средняя величина кика.



Определение скоростной моды пульсара

Чтобы определить к какой моде относится пульсар, по распределению киковой скорости каждого места рождения этого пульсара вычисляется вероятность ‘попадания’ в моду:

$$p_{1,2} \propto \sum_{i=1}^{1000} f_{1,2}(v_i) \quad p_1 + p_2 = 1$$

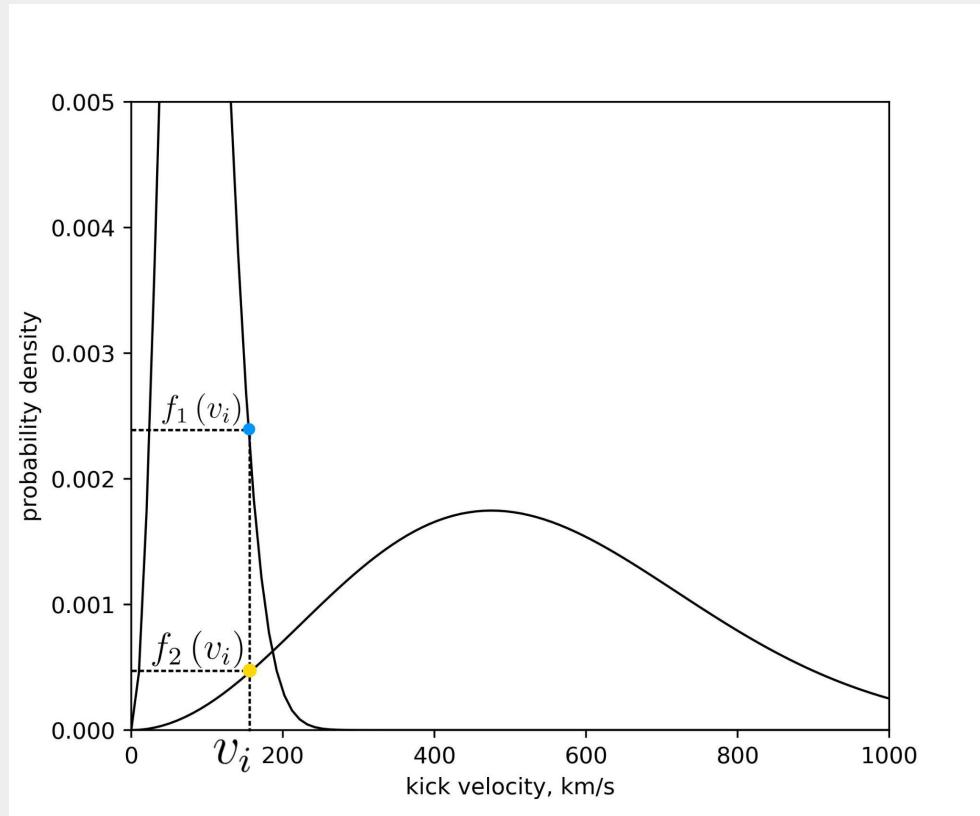
$$f_{1,2}(v_i)$$

- Максвелловское распределение, соответствующее 1 или 2 моде кикового распределения.

Для каждого значения кика v_i вычисляются значения вероятностей f_1 и f_2 по распределению Максвелла (см. рис).

При скорости меньше критической вероятность для низкоскоростной моды выше.

Вероятность попадания в каждую моду (p_1 и p_2) пропорциональна сумме значений f_1 и f_2 , соответственно.



Определение моды кика пульсара

Из выборки в 176 пульсаров:

- У 157 однозначна мода ($p_{1,2} > 0.6$) во всех возможных местах его рождения.
Для трёх из них, если не учитывать точку $t = -\tau_c$ из-за большой координаты z в этой точке для большинства итераций ($z > 2$ кпк).
- У пяти вероятность попасть в ту или иную моду $0.4 < p_{1,2} < 0.6$
- У 14 выбранные моды различны в разных возможных местах рождения.
Мода таких пульсаров выбиралась по критерию:
“Выбирается та мода, которая встречается чаще для разных мест рождения”.

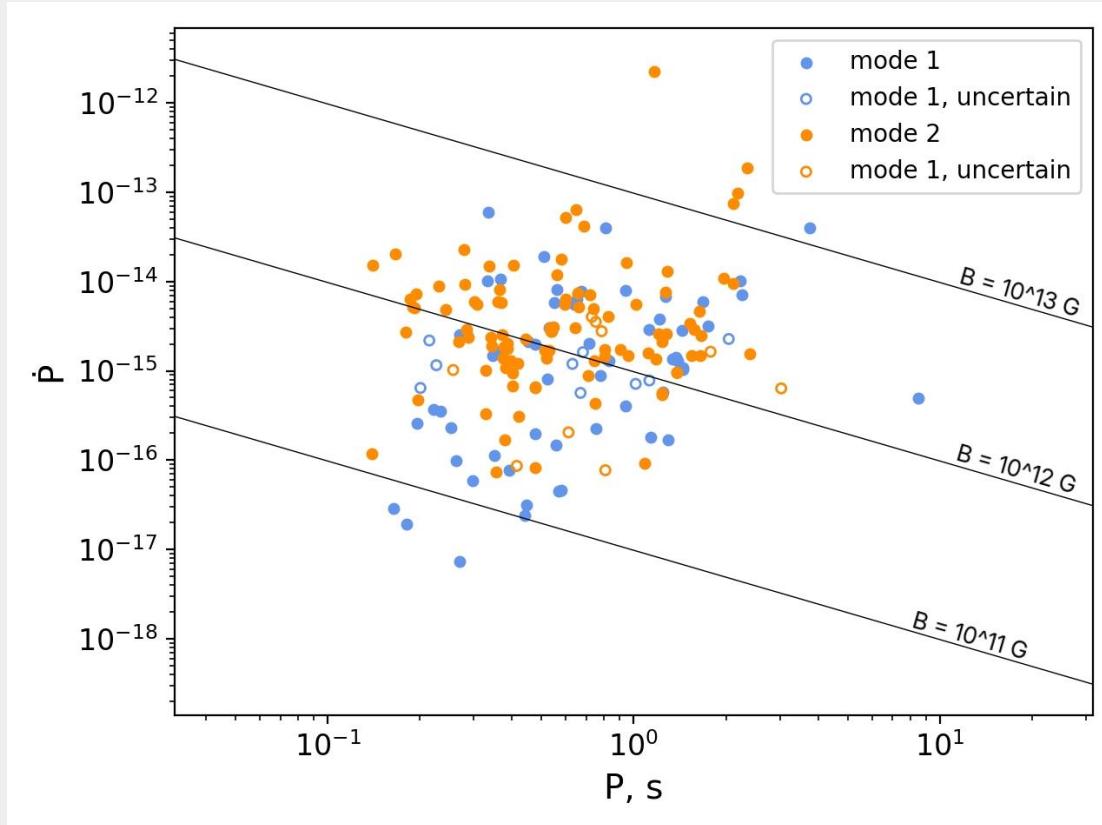
Последние 2 группы пульсаров учитываются в статистике аналогично первой, но отмечены отдельными символами на графиках.

P-Pdot диаграмма

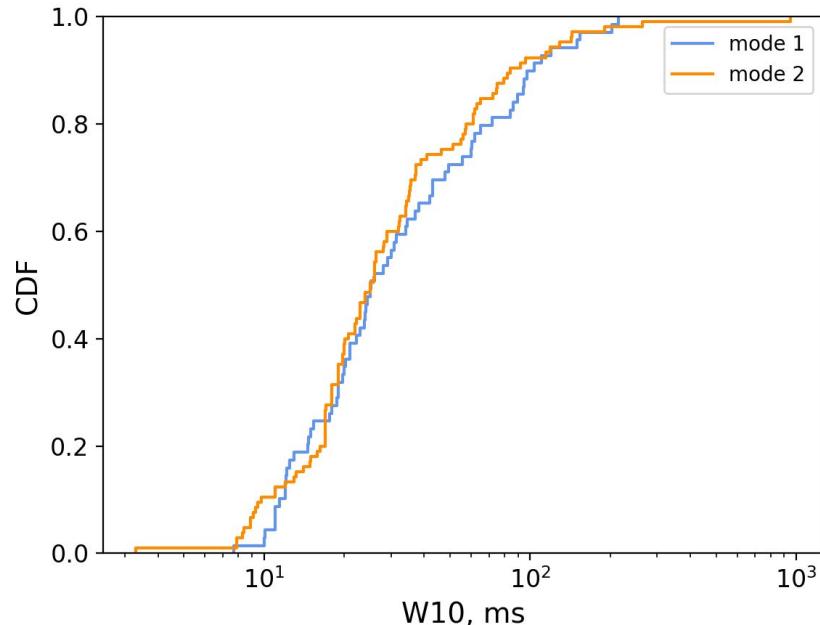
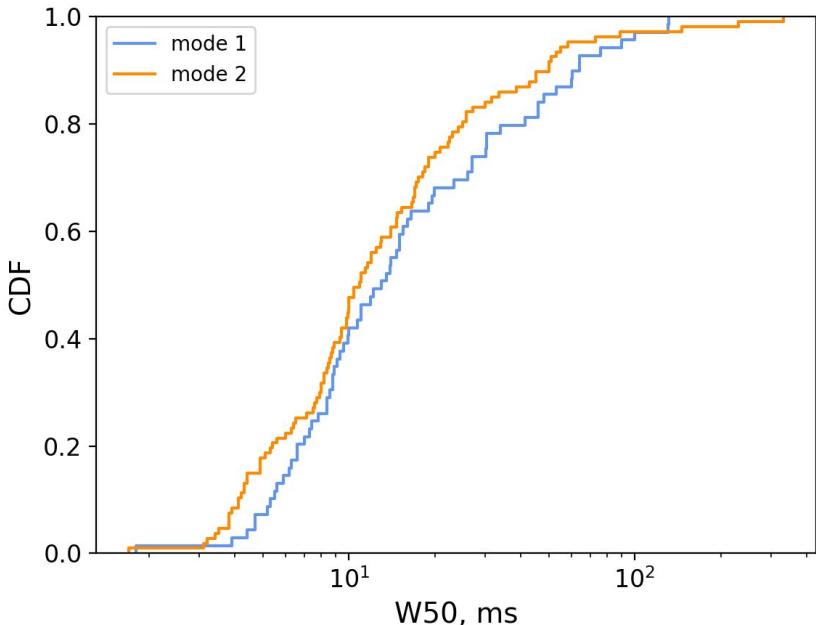
Из 176 пульсаров:

- 69 в первой моде
- 107 во второй моде

Виден эффект селекции:
более высокоскоростные
пульсары имеют в среднем
большие потери энергии
вращения.



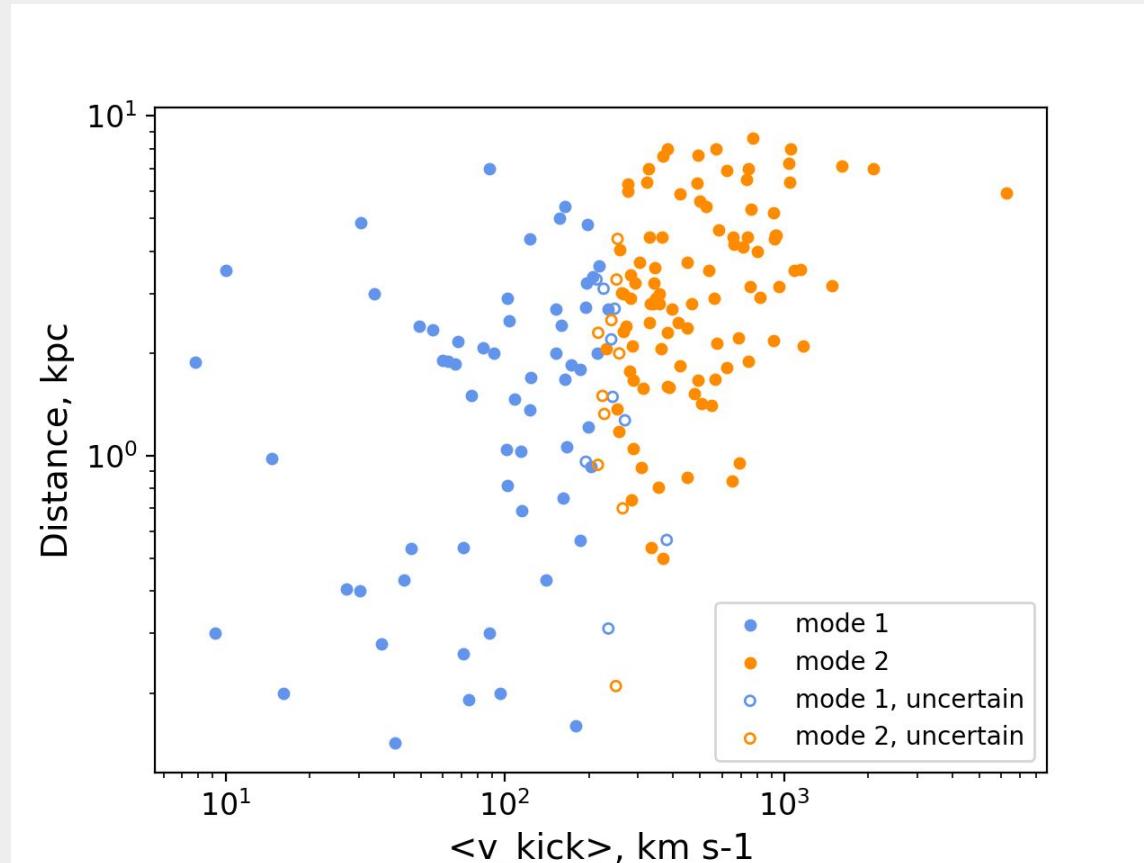
Ширина импульсов



Можно ожидать, что величины W_{50} и W_{10} мало подвержены эффектам селекции. Распределения для двух мод скоростей кика практически совпадают друг с другом.

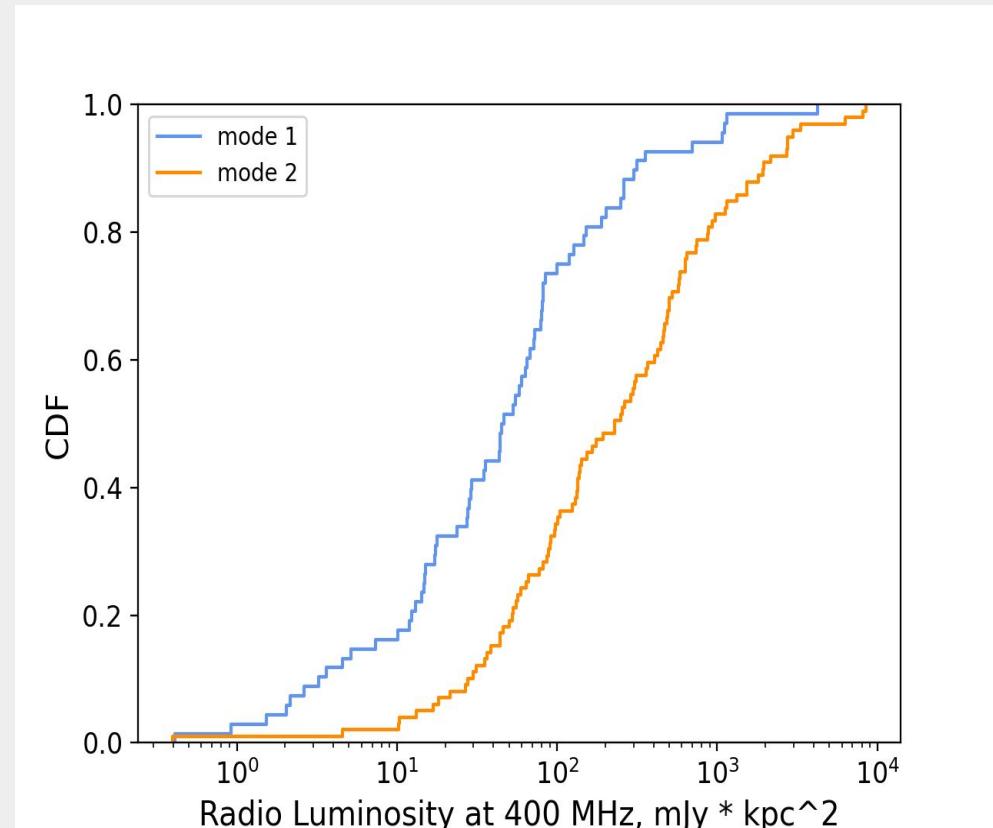
Эффекты селекции

Малые величины скоростей сложно измерять на больших расстояниях.
Это приводит к селекции, поскольку на больших расстояниях сложнее наблюдать слабые пульсары.



Эффекты селекции

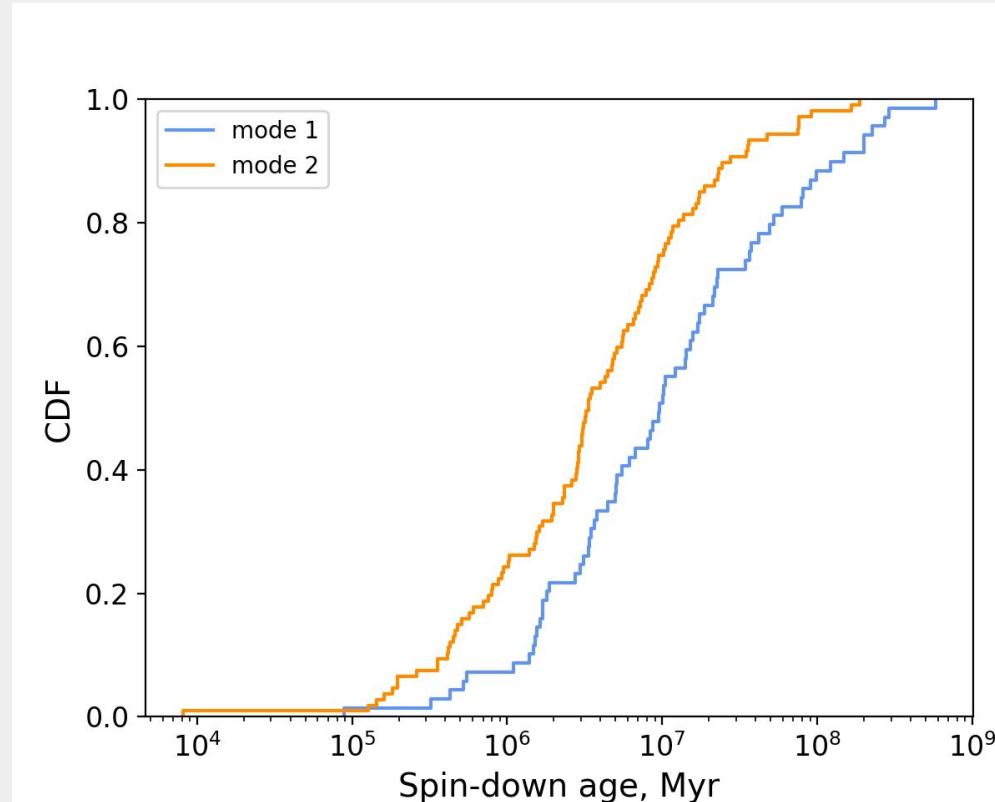
Интегральные распределения радиосветимости демонстрируют четкий эффект селекции.



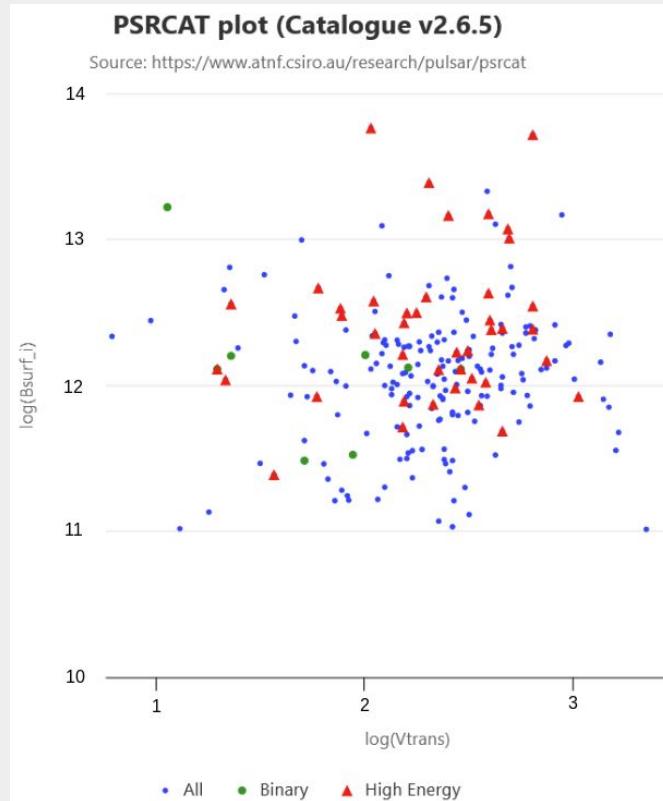
Эффекты селекции

В среднем пульсары с более высокой радиосветимостью имеют меньшие характеристические возраста.

Из-за соответствующего эффекта селекции возникает разница между распределениями для двух мод.



Отсутствие явной корреляции $V_{\text{trans}} - B_{\text{eff}}$ в данных ATNF



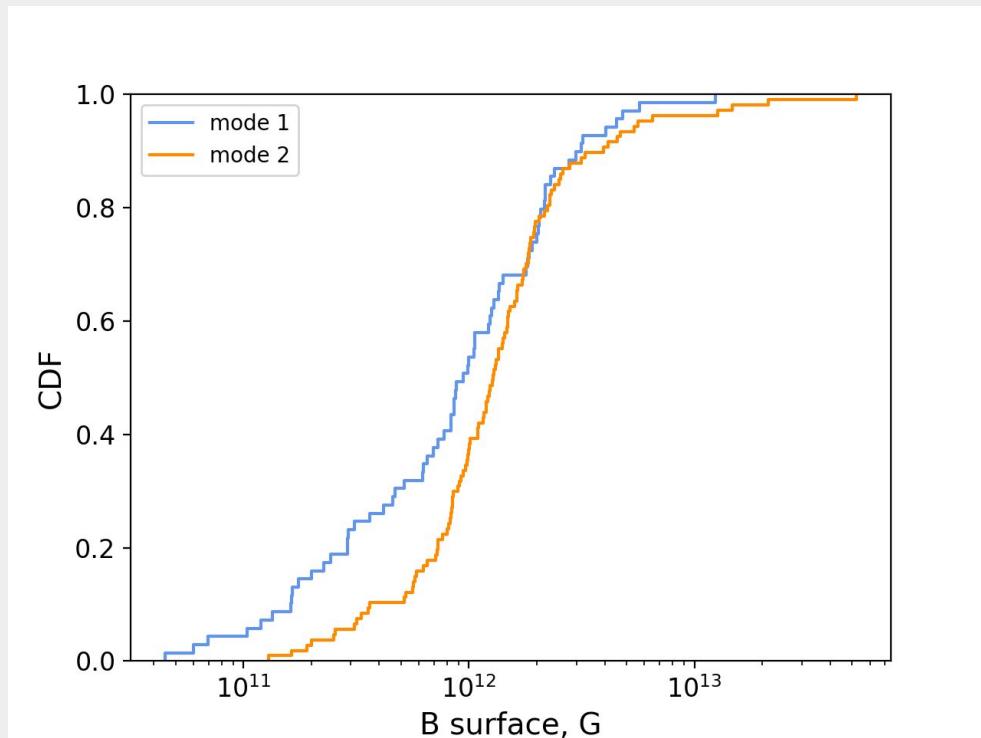
Неоднократные попытки обнаружить корреляцию эффективного магнитного поля и скорости пульсаров не приводили к положительному результату.

Распределение магнитных полей

Интегральные распределения по магнитным полям для двух мод демонстрируют интересные различия.

В низкоскоростной моде больше доля пульсаров с низкими полями.

Это может быть как реальным различием, так и эффектом селекции.

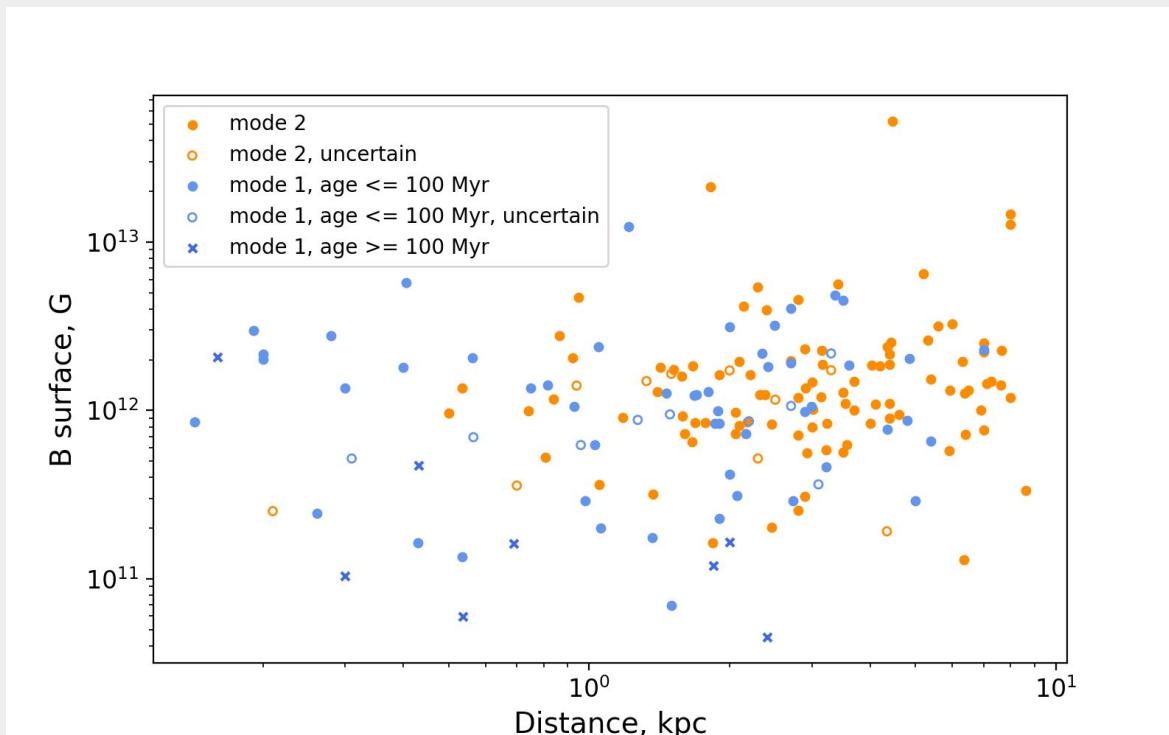


Магнитные поля и скорости

Видно, что и на малых, и на больших расстояниях среди пульсаров с низкими полями доминируют объекты из низкоскоростной моды.

Хотя в значительной степени это связано со старыми объектами, для которых определение начальной скорости может быть не столь надежно.

Но может быть, это указание на затухание поля.



Обсуждение

Планы:

- Увеличение выборки
- Сравнение с другими расчетами
- Сравнение с другими бимодальными распределениями
- Использование дополнительных данных по отдельным пульсарам
- Анализ возможной роли двойных систем (вклад орбитальной скорости) и роли скорости прародителя

Вопросы:

- Почему в первой моде почти в два раза больше пульсаров, чем предсказано?
- Интерпретация различий в распределении по магнитным полям

Выводы

- Мы провели моделирование, позволяющие отнести наблюдаемые пульсары к низкоскоростной или высокоскоростной части распределения по кику. Из 176 пульсаров 69 относятся к первой моде ($<\sim 40\%$).
- Нами проведены сравнения распределений некоторых ключевых параметров для пульсаров из разных мод распределения.
- Для параметров, малоподверженных эффектам селекции (W10, W50), распределения для пульсаров из двух мод не различаются
- Для некоторых параметров (радиосветимости, характеристические возраста) мы видим явные эффекты селекции.
- Обнаружено различие в распределении по магнитным полям, интерпретация которого не ясна (селекция, физические различия или затухание поля).

