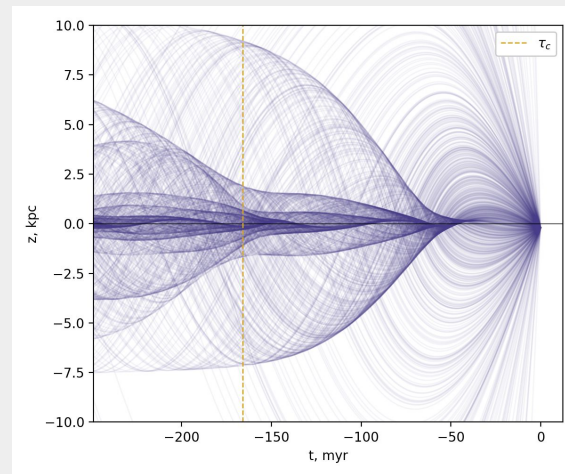


# Бимодальность кика радиопульсаров и ее связь с другими параметрами

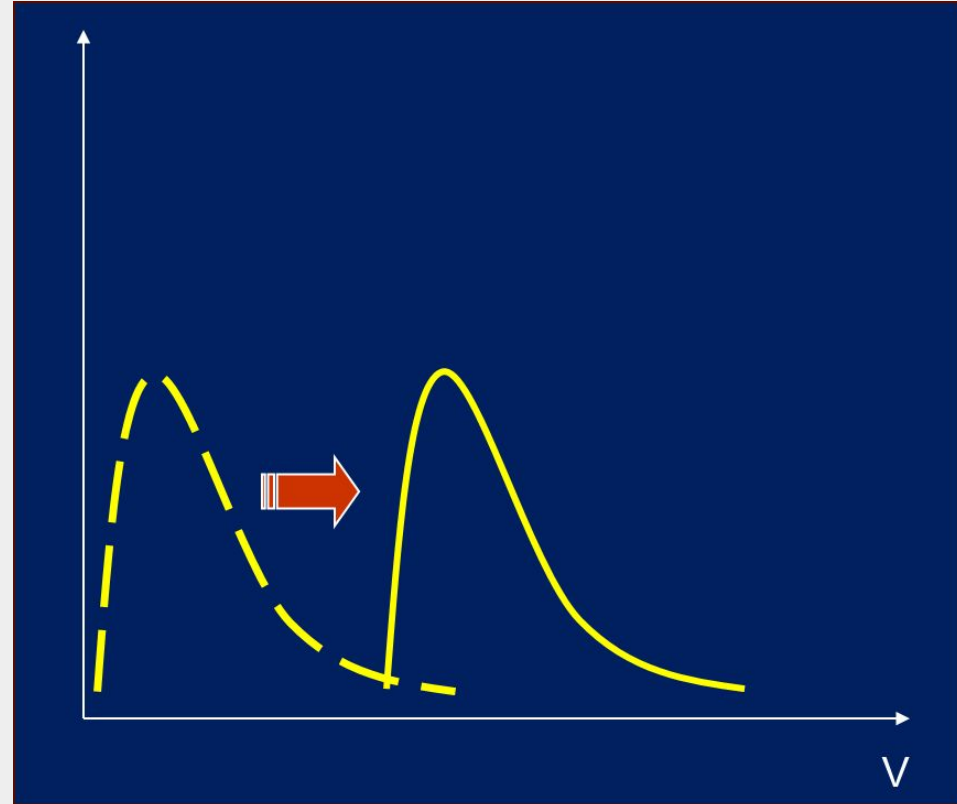
Антон Лазарев, Сергей Попов  
(ГАИШ МГУ)



# Скорости нейтронных звезд

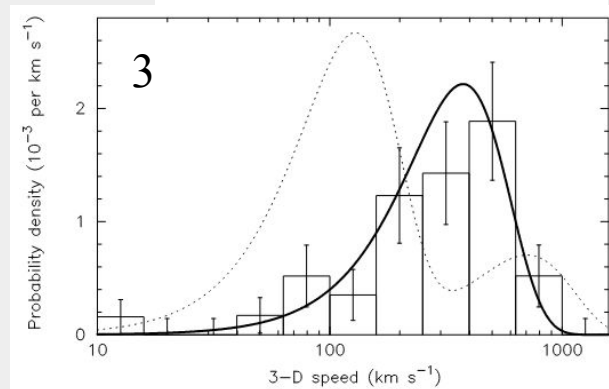
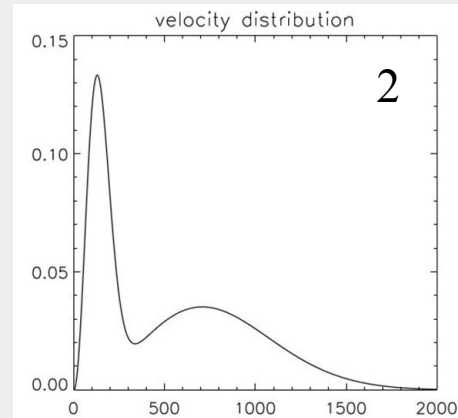
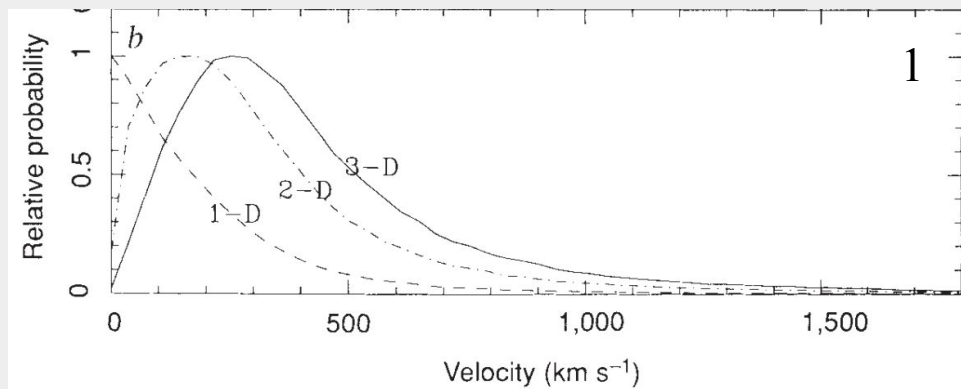
Практически сразу после открытия стало ясно, что радиопульсары имеют пространственные скорости, которые существенно превосходят скорости их прародителей - массивных звезд. Уже в 1970 г. начали рассматривать модели, объясняющие высокие пространственные скорости радиопульсаров (Шкловский, Gott et al., Gunn and Ostriker).

См. обзор в [arXiv:2509.01430](https://arxiv.org/abs/2509.01430)



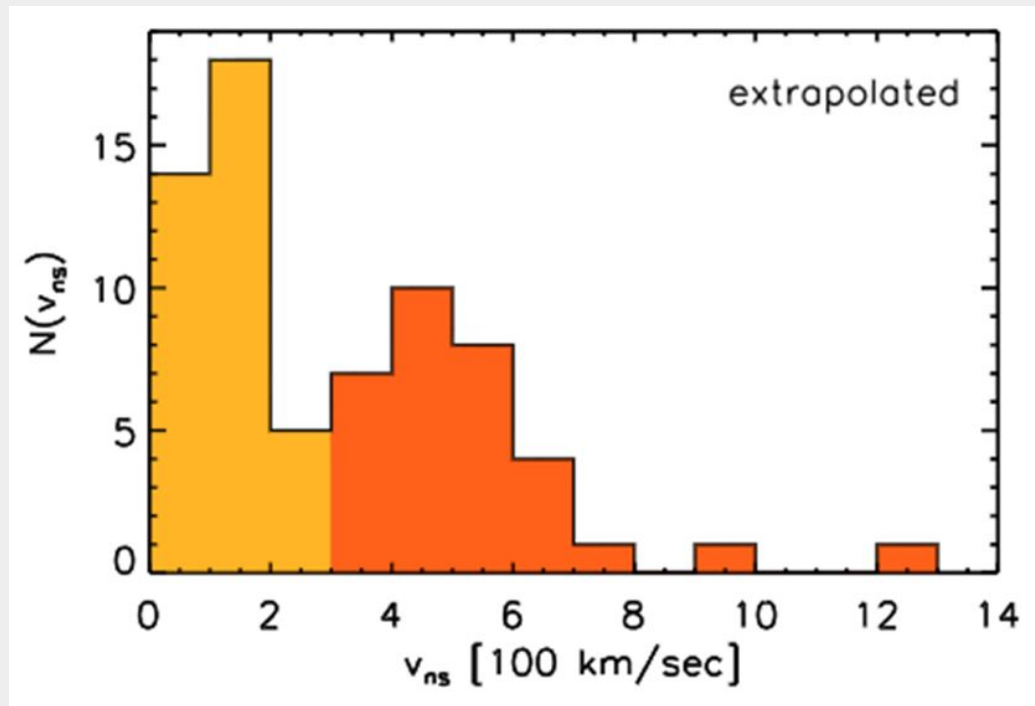
# Различные модели распределения скорости кика

- (1) Lyne и Lorimer, 1994 - анализ собственных движений с использованием модели Галактической электронной плотности (Taylor и Cordes, 1993):  
Распределение киков со средней скоростью  $450 \pm 90$  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.



# 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

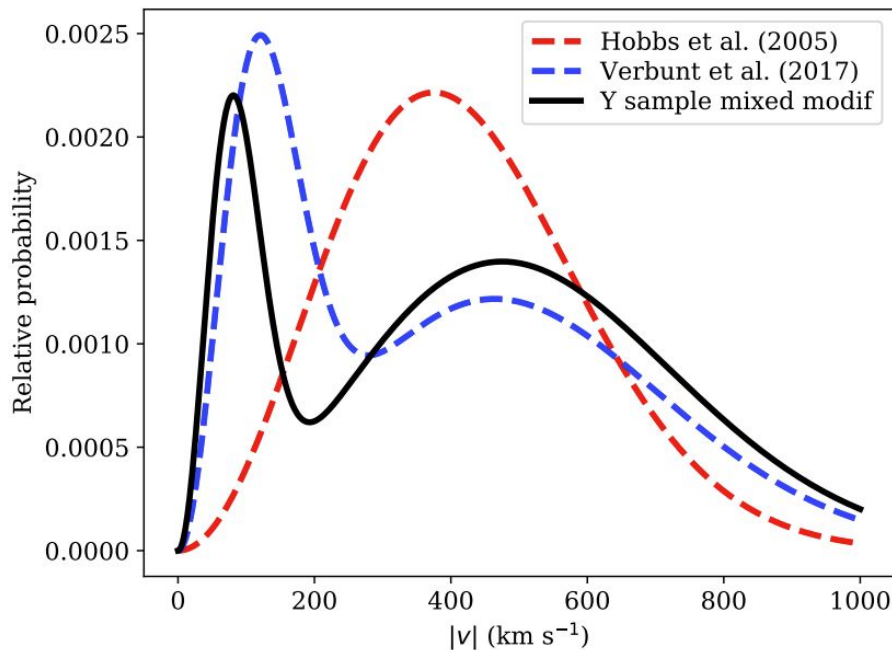
Распределение начальной скорости пульсаров с возрастом  $< 3$  млн. лет

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

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 различий 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

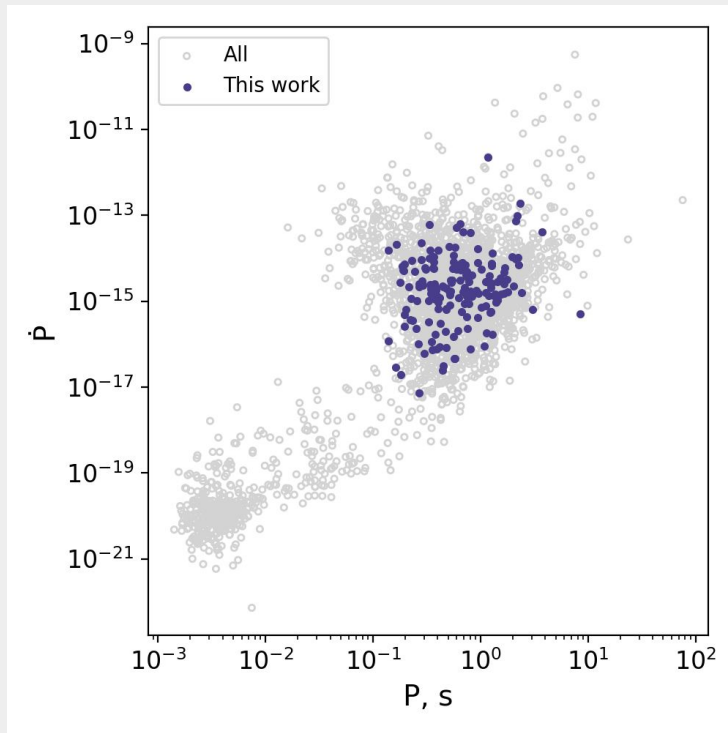


# Выборка радиопульсаров

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.

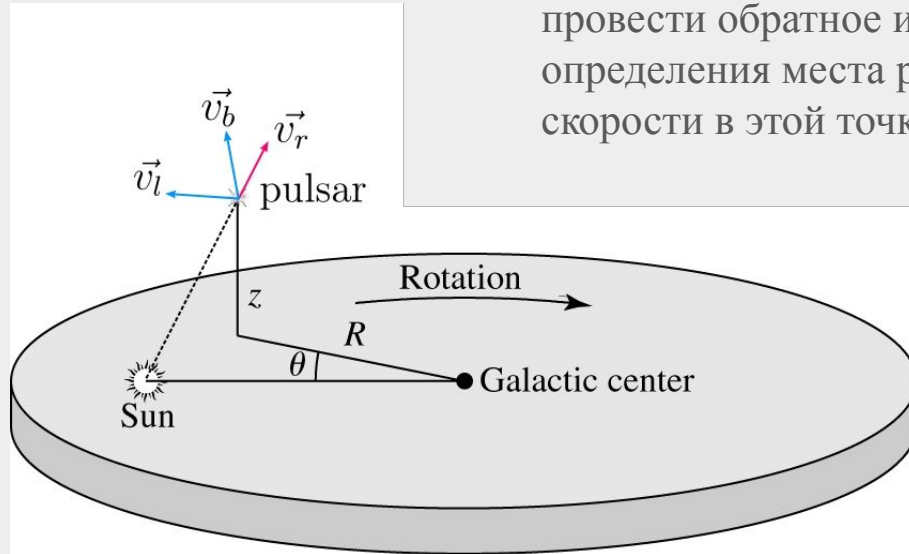
Всего - 176 пульсаров.



# 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.

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

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

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

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

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.

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

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

Gaspari et al., 2024

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

$$\vec{v}_t$$

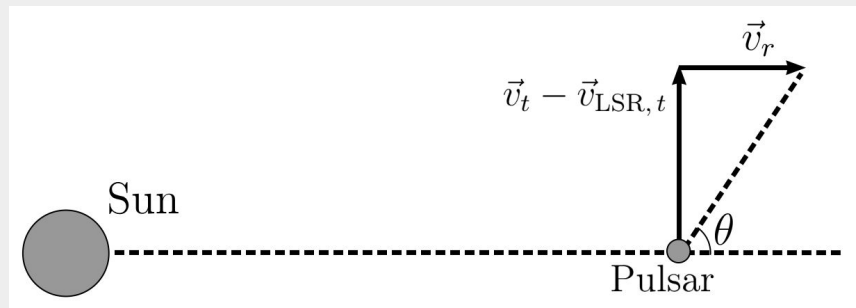
- трансверсальная и лучевая компоненты скорости локального стандарта покоя

- трансверсальная скорость пульсара плюс проекция скорости Солнца на картинную плоскость

# Метод моделирования. 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.



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

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

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. 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  
компонента 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:

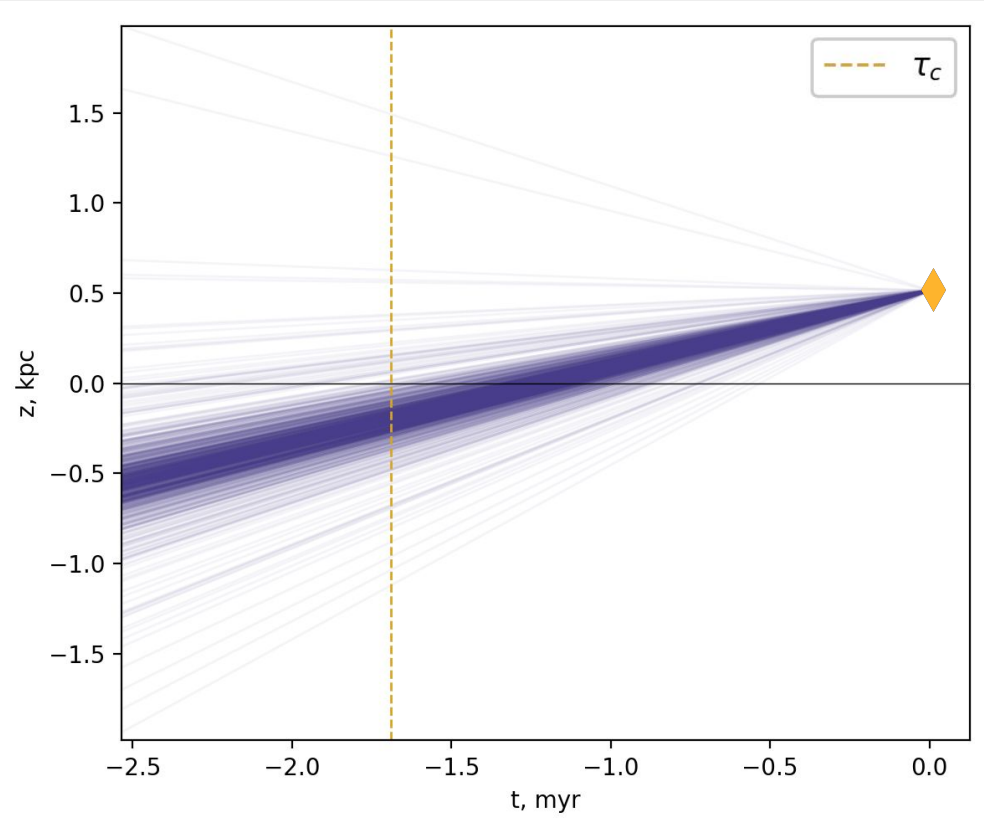
1. Вычисляются координаты в Галактоцентрической система отсчета.
2. Значение лучевой скорости разыгрывается  $n = 1000$  раз.
3. Для каждого значения лучевой скорости вычисляется 3D скорость в Галактоцентрической системе координат.
4. В потенциале **McMillan17** (McMillan, 2017) орбиты интегрируются 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.

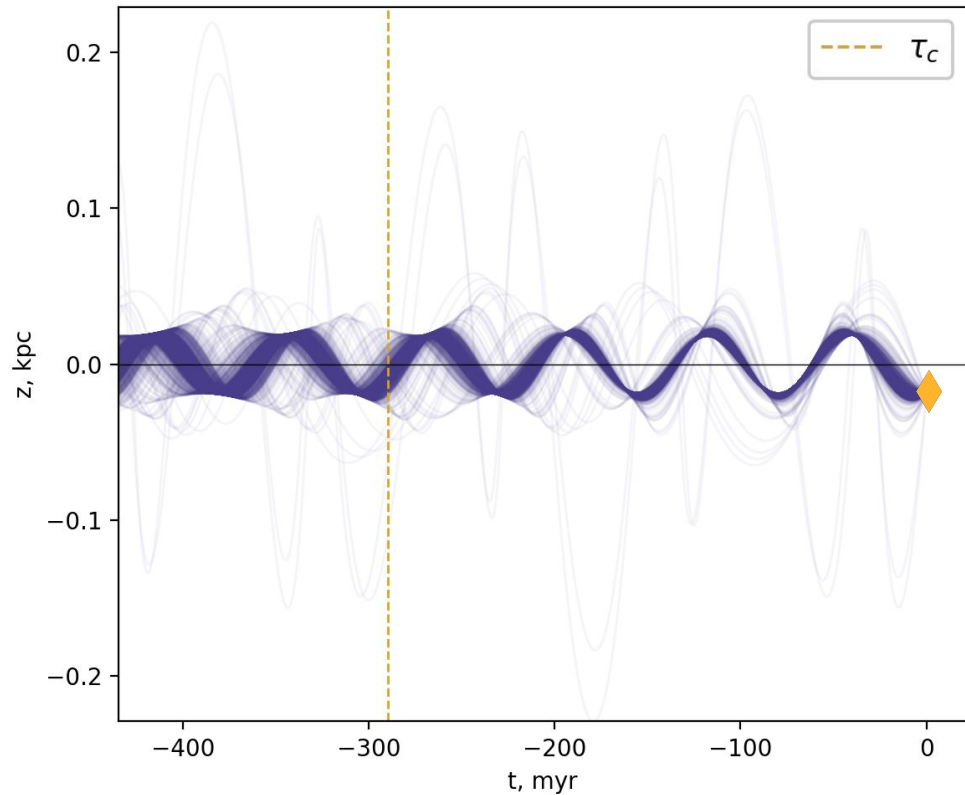
Центр 'конуса' соответствует среднему значению лучевой скорости, то есть нулевой лучевой скорости относительно локального стандарта покоя.



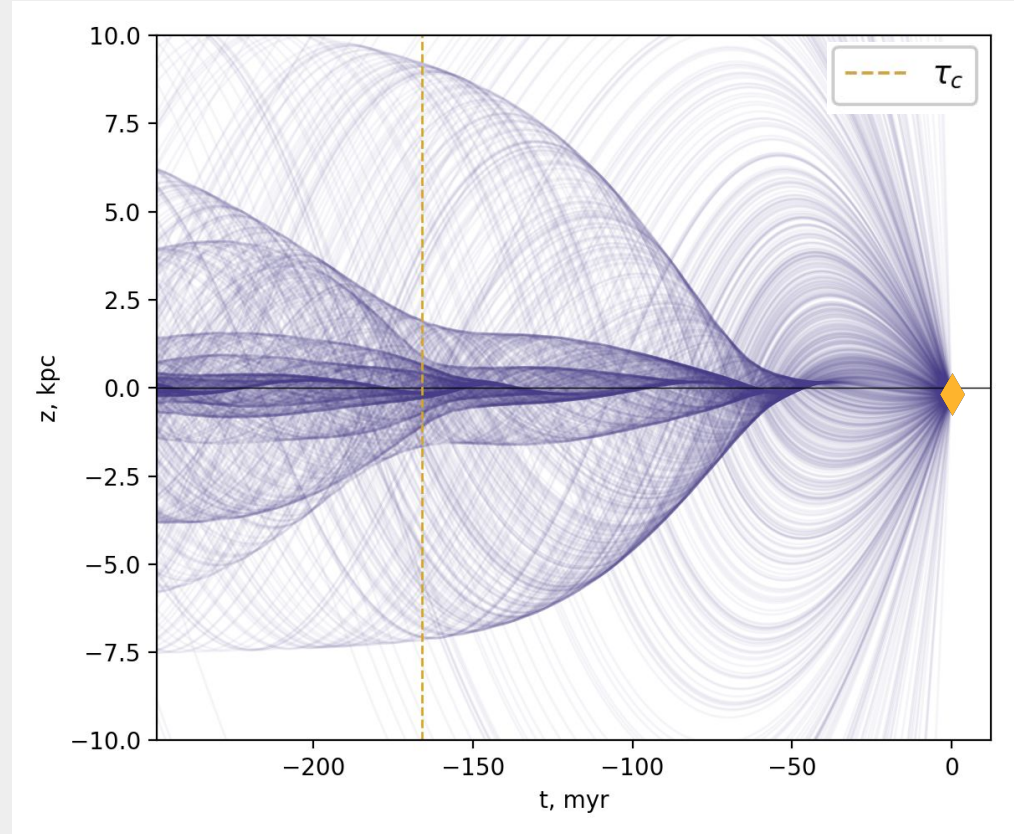
Пример вычисления траекторий для PSR B1944+17. График  $z(t)$ .  
Современный момент времени- справа.

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  
зависит от значения лучевой скорости.  
Место рождения пульсара становится  
крайне неопределённым.





# Место рождения пульсара

Величина кика 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.

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

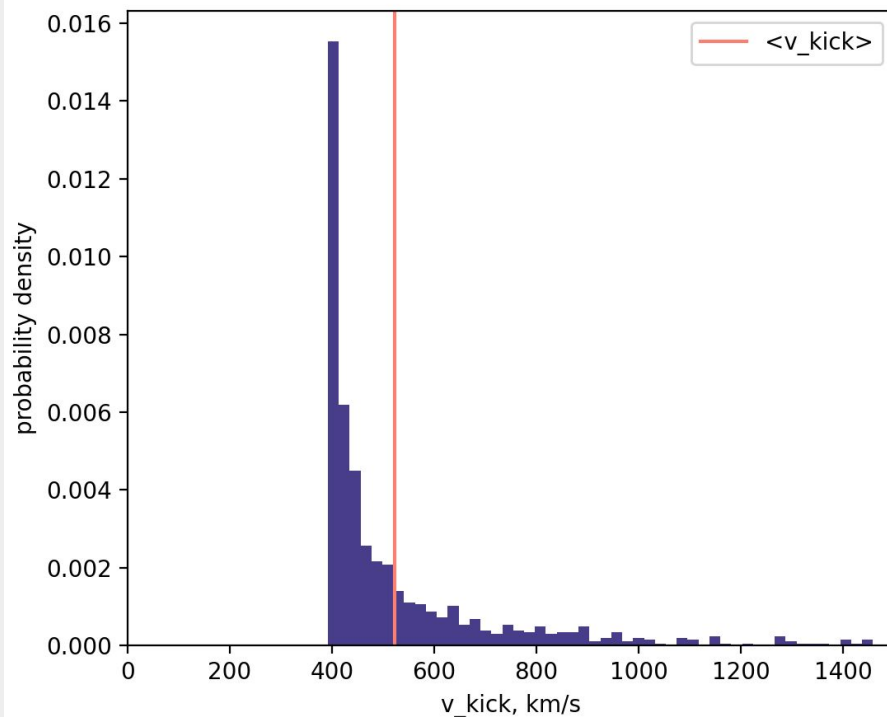
$$\vec{v}_{\text{birth}} = \begin{pmatrix} v_R(t_0) \\ v_\phi(t_0) - v_{\text{circular}}(R(t_0)) \\ v_z(t_0) \end{pmatrix}$$

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

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:

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

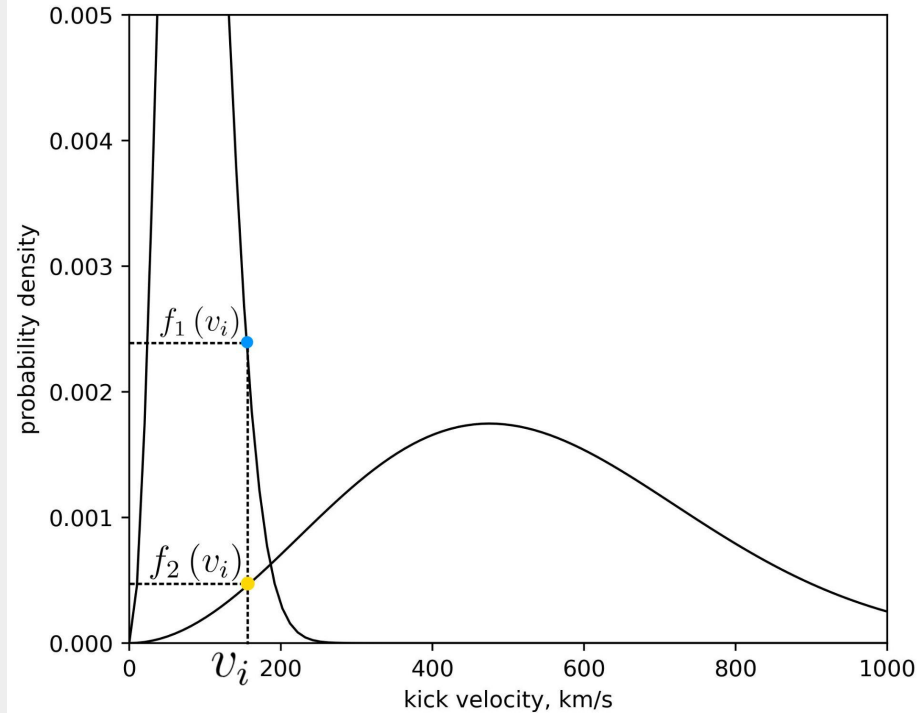
$$f_{1,2}(v_i)$$

- 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 выбранная мода различна в разных возможных местах рождения.

Мода таких пульсаров выбиралась по критерию:

“Выбирается та мода, которая встречается чаще для разных мест рождения”.

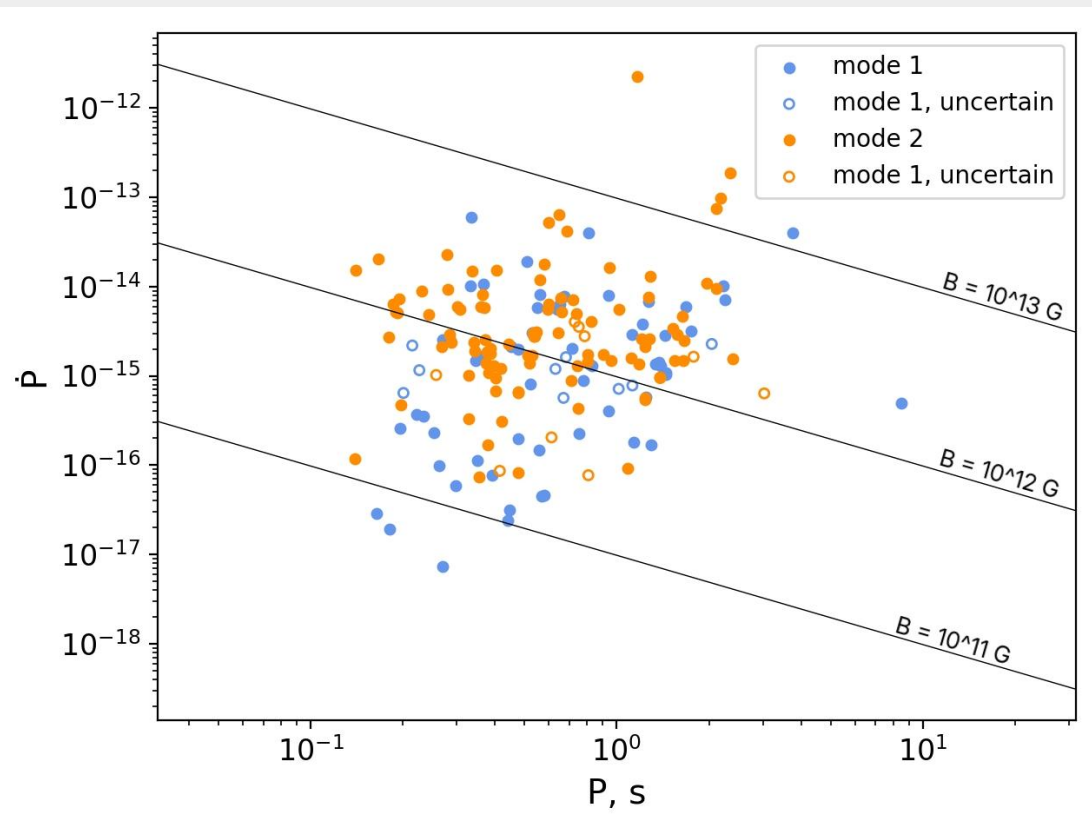
Последние 2 группы пульсаров учитываются в статистике аналогично первой, но отмечены отдельными символами на графиках.

# P-Pdot диаграмма

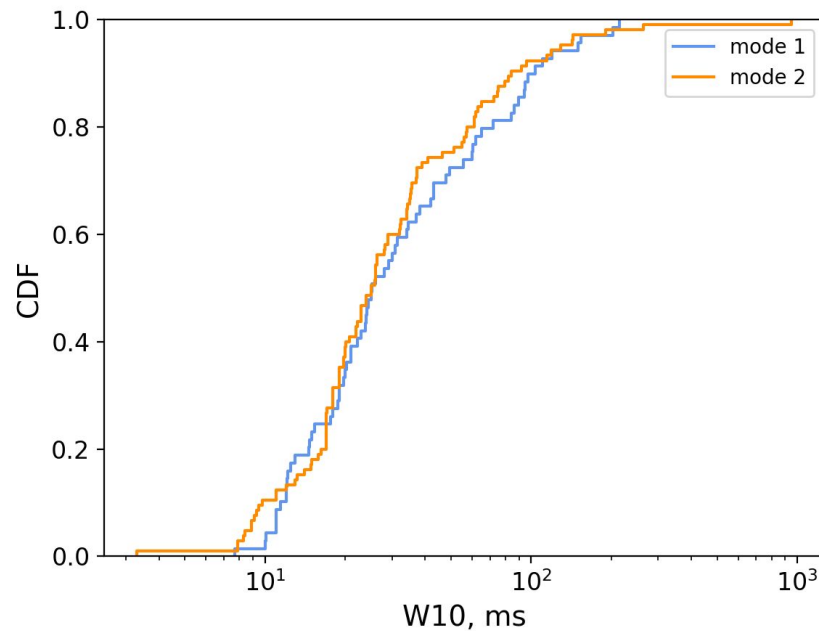
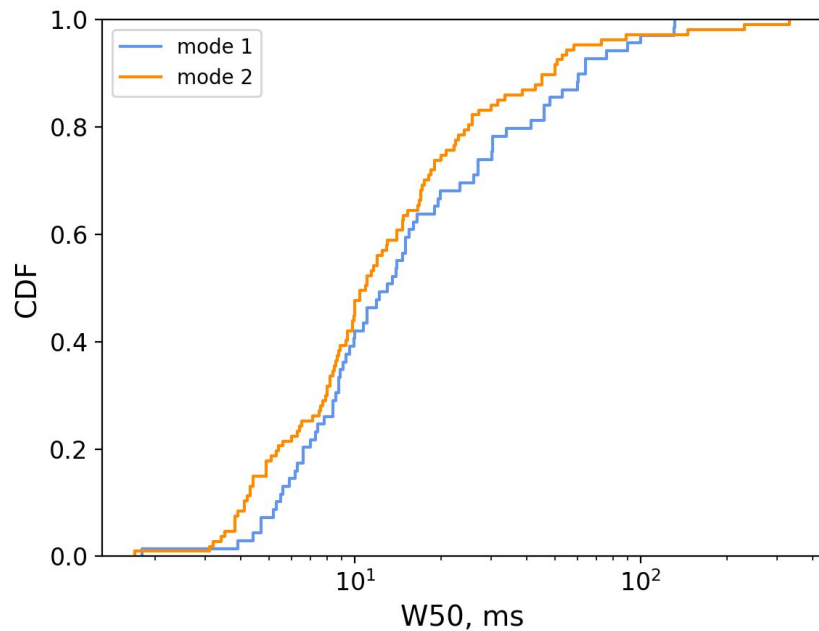
Из 176 пульсаров:

- 69 в первой моде
- 107 во второй моде

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



# Ширина импульсов



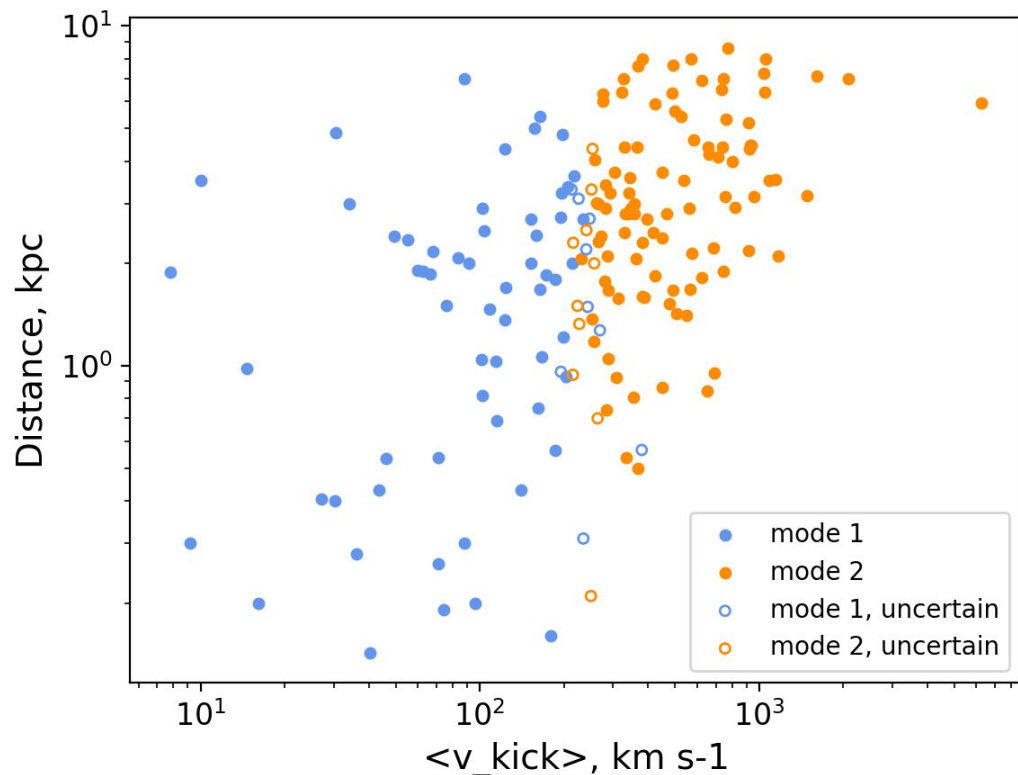
Можно ожидать, что величины  $W_{50}$  и  $W_{10}$  мало подвержена эффектам селекции. Распределения для двух мод скоростей кика практически совпадают друг с другом.



# Эффекты селекции

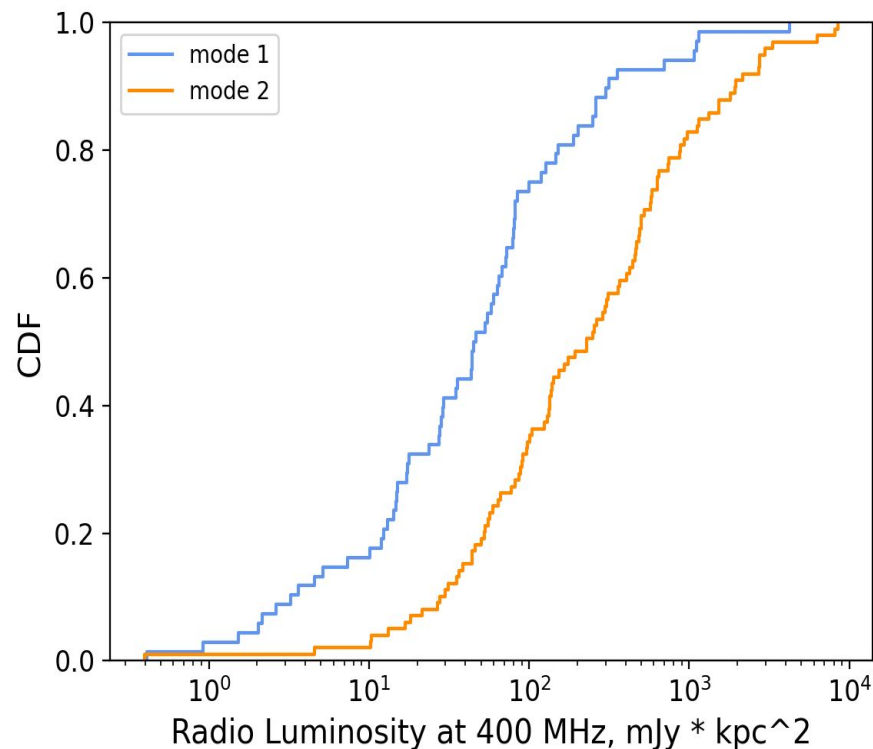
Малые величины скоростей сложно измерять на больших расстояниях.

Это приводит к селекции, поскольку на больших расстояниях сложнее наблюдать слабые пульсары.



# Эффекты селекции

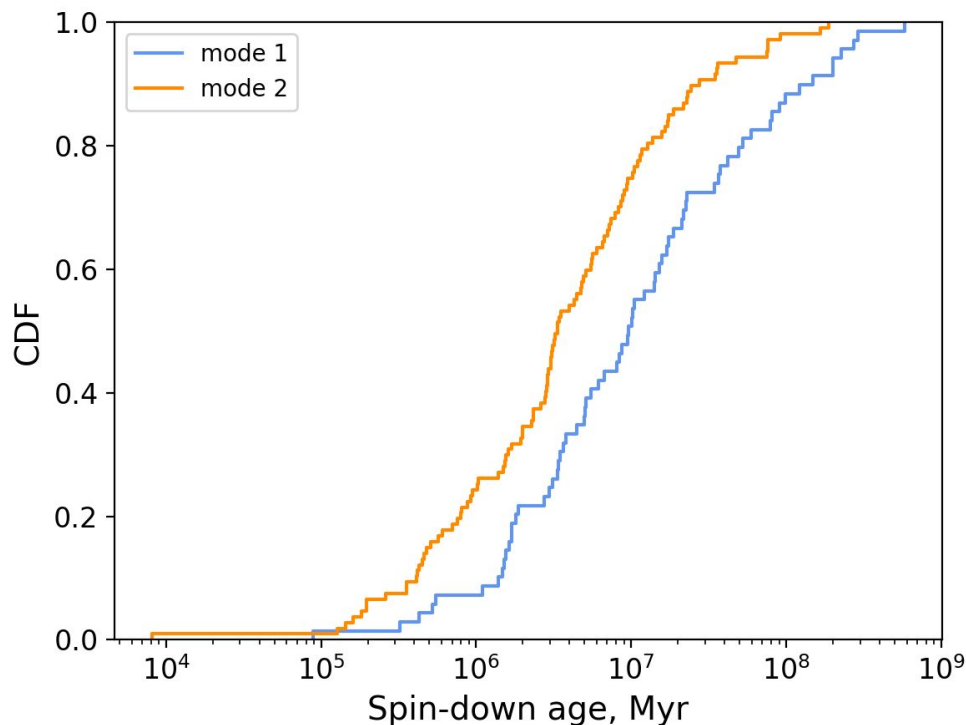
Интегральные распределения радиосветимости демонстрируют четкий эффект селекции.



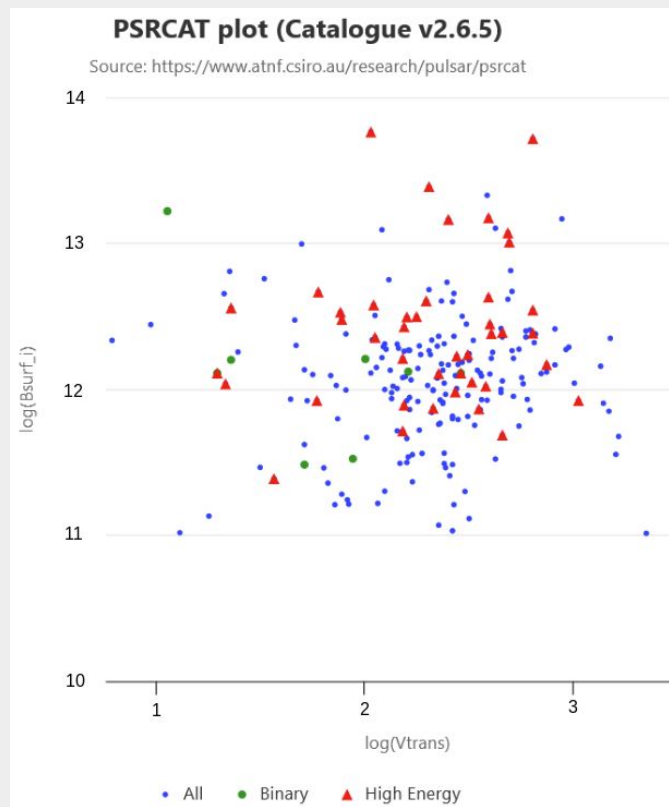
# Эффекты селекции

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



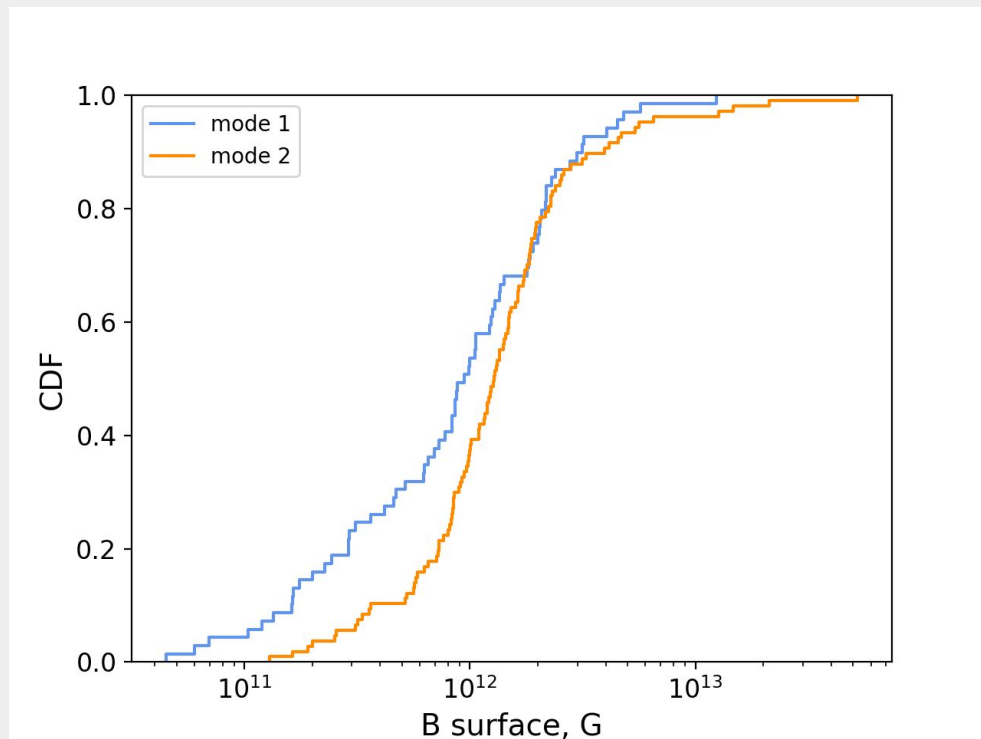
Неоднократные попытки обнаружить корреляцию эффективного магнитного поля и скорости пульсаров не приводили к положительному результату.

# 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.

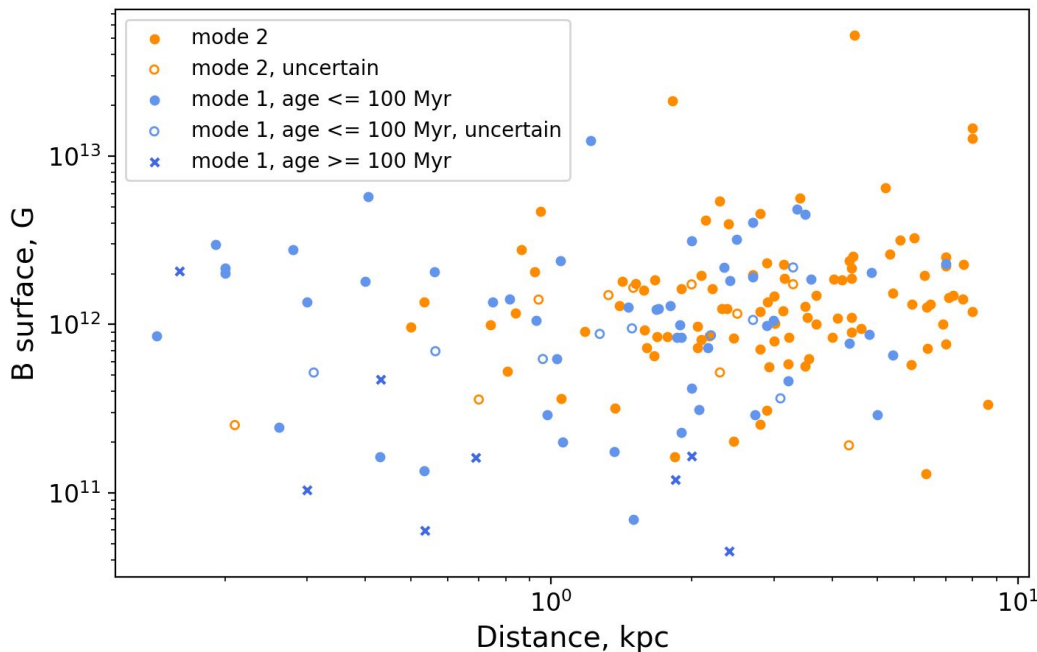


# Магнитные поля и скорости

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 киксу. 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 ( $W_{10}$ ,  $W_{50}$ ), 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).



