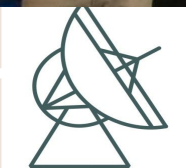


На пороге детектирования гравитационно-волнового фона: статус международной пульсарной коллаборации сегодня

Порайко Наталия

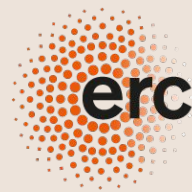
от имени  EPTA



Max-Planck-Institut
für Radioastronomie



InPTA
Indian Pulsar Timing Array



ЕРТА + InРТА: знакомство

Телескопы-участники:

- Еффельсберг (100)
- Ловелл (66)
- Нансей (100)
- Сардиния (64)
- Вестербург (93)

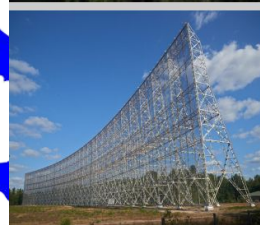
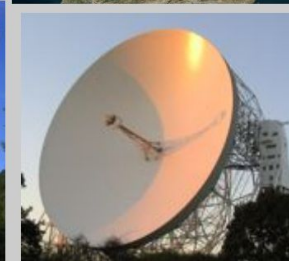
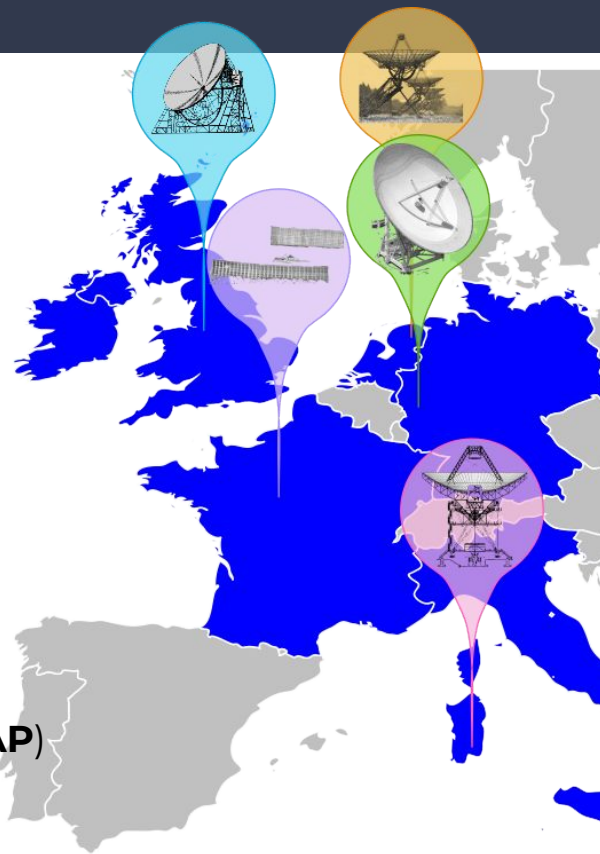
+

GMRT в Индии

+

Large European Array for Pulsars (**LEAP**)

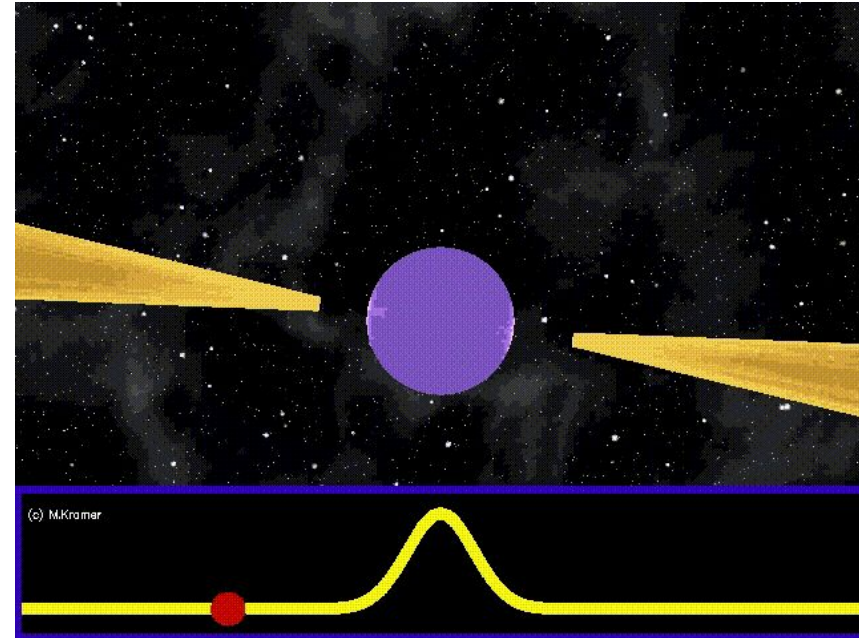
Low Frequency Array (**LOFAR**)



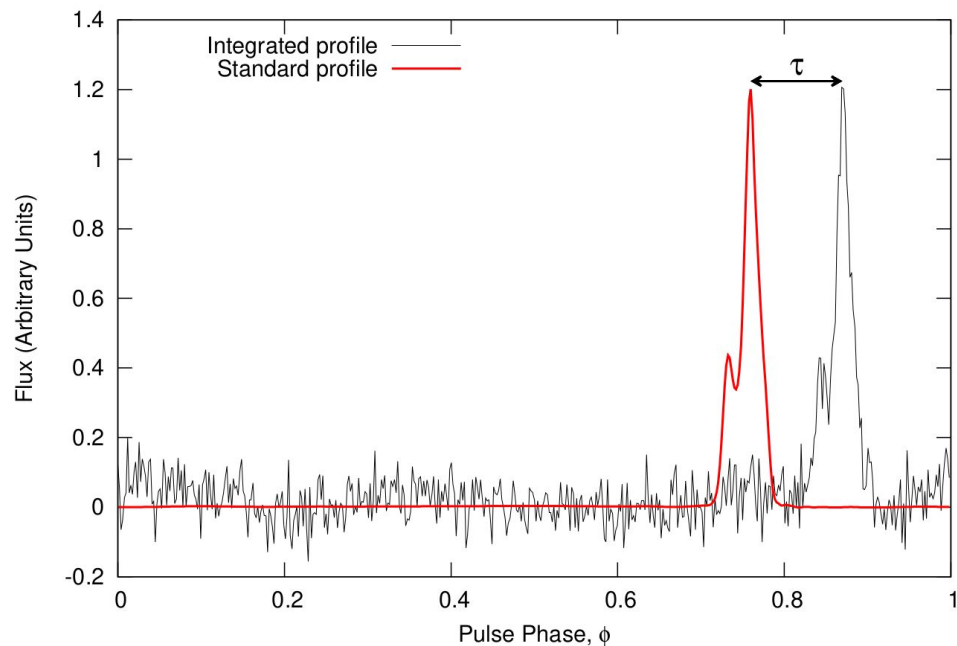
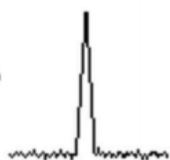
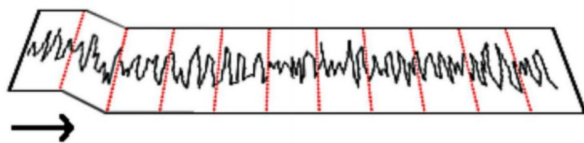
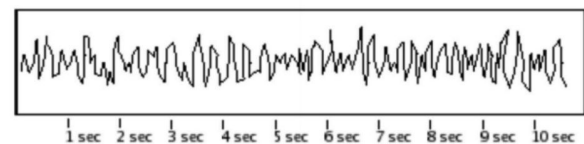
Пульсары: знакомство

Нейтронные звезды:

- Быстро вращающиеся. Периоды от нескольких мс до сек
- Сильно намагниченные $\sim 10^8 - 10^{15} \text{G}$
- Чрезвычайно плотные $\rho > 10^{14} \text{g/cm}^3$
- **Стабильные ротаторы**
("Галактические часы")

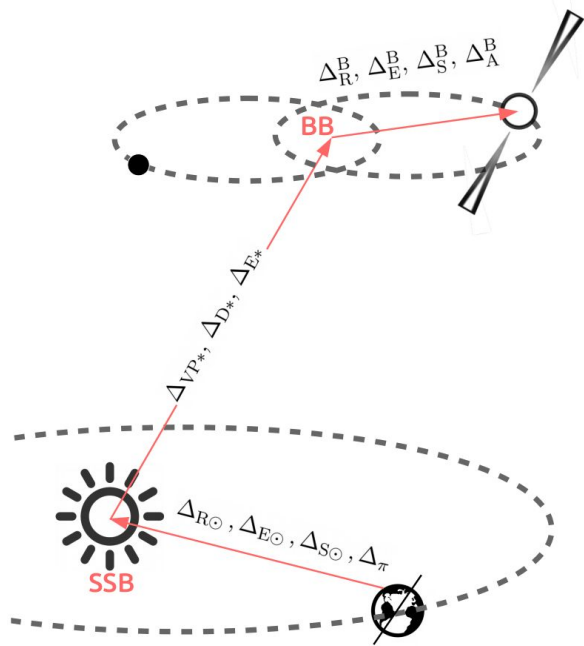


Пульсарный тайминг



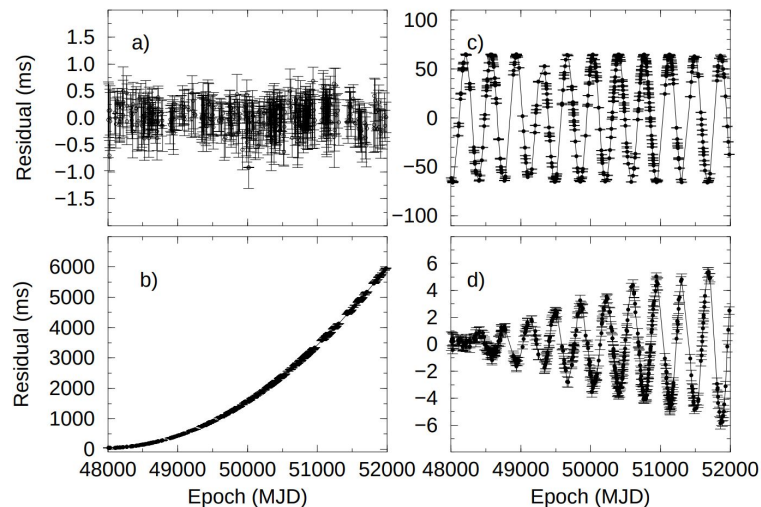
Credit: Ridolfi, PhD thesis

Пульсарный тайминг

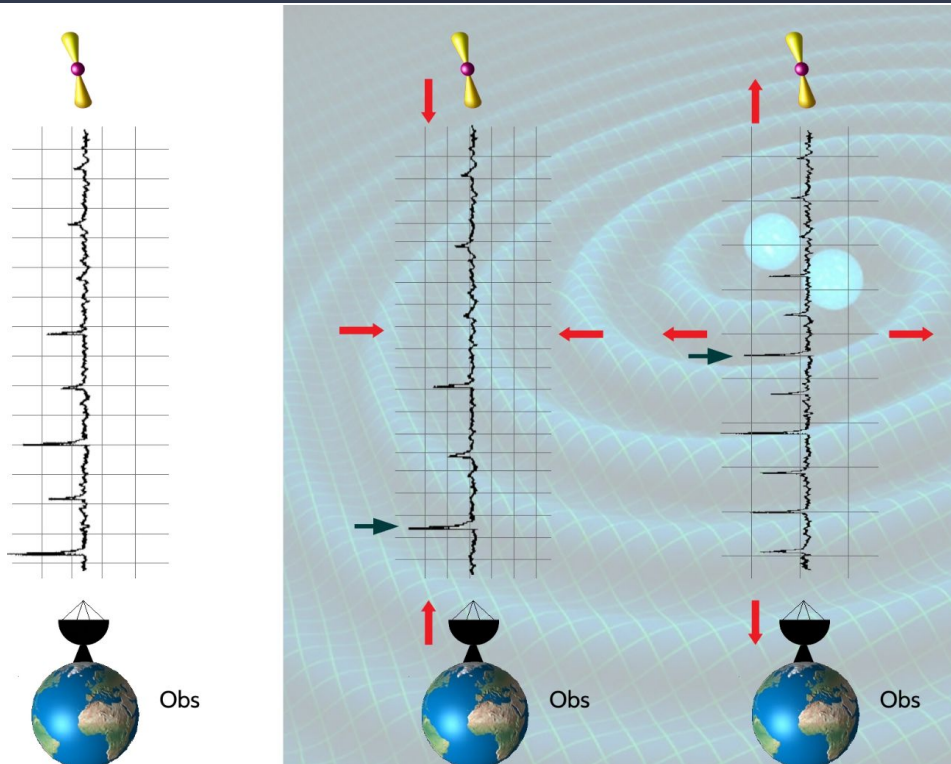


$$t_{\text{SSB}} = t_{\text{topo}} + t_{\text{corr}} - \frac{\Delta D}{f^2} + \underbrace{\Delta_{R\odot} + \Delta_{S\odot} + \Delta_{E\odot}}_{\text{Solar system terms}} + \underbrace{\Delta_{RB} + \Delta_{SB} + \Delta_{EB}}_{\text{(pulsar binary terms)}}$$

t_{SSB} : Conversion to topocentric (time at observatory)
 t_{topo} : Clock corrections
 t_{corr} : Dispersion measure
 $\Delta_{R\odot}$: Römer delay
 $\Delta_{S\odot}$: Shapiro delay
 $\Delta_{E\odot}$: Einstein delay



Отклик антенны на ГВ



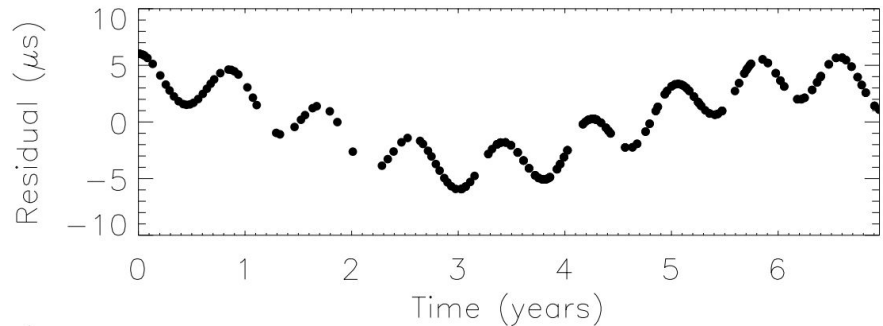
Credit: C. Tiburzi slide

$$R(t) = \frac{1}{2} (1 + \cos \mu) x$$

$$[r_+(t) \cos 2\psi + r_x(t) \sin 2\psi]$$

$\sim e^{i\omega t}$, $\omega = 2\omega_{\text{orb}}$

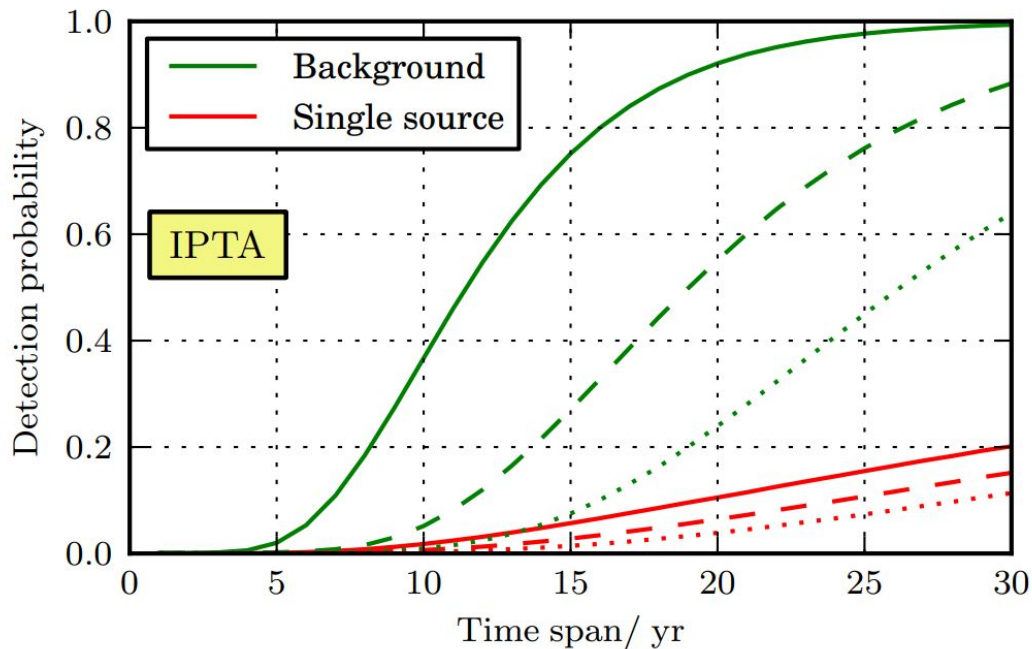
$$r_{+,x}(t) = r_{+,x}^E(t) - r_{+,x}^P(t)$$



Credit: Jenet et al 2004

Отклик антенны на ГВ фон

Credit: Rosado, Sesana, Gair 2015



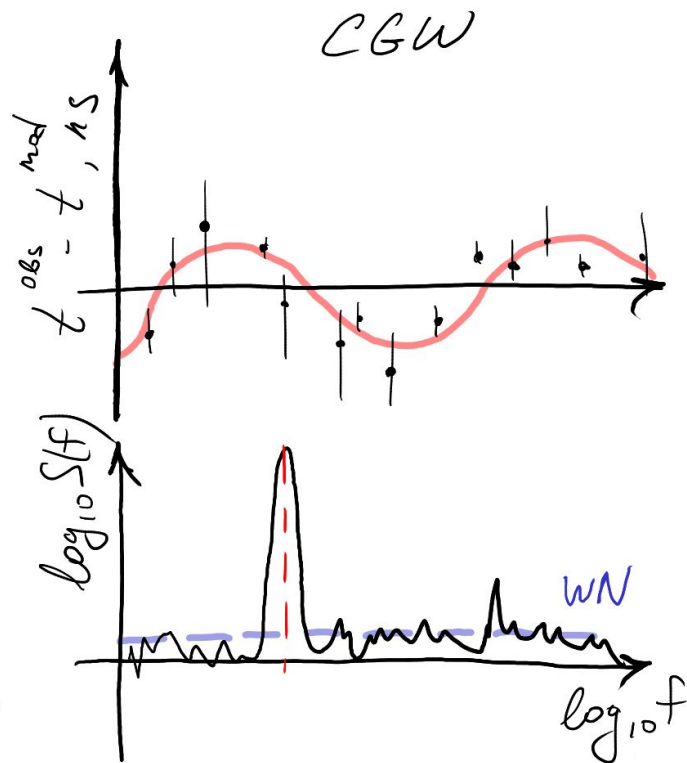
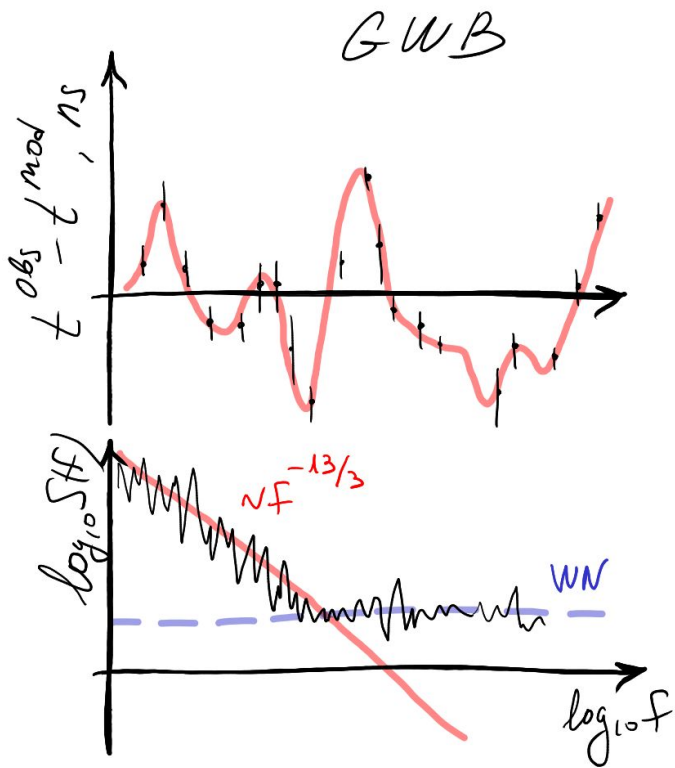
$$\Omega_{\text{GWB}} \sim f^{2/3}$$
$$h_c(f) \sim f^{-2/3}$$

↓

$$S(f) \sim f^{-13/3}$$

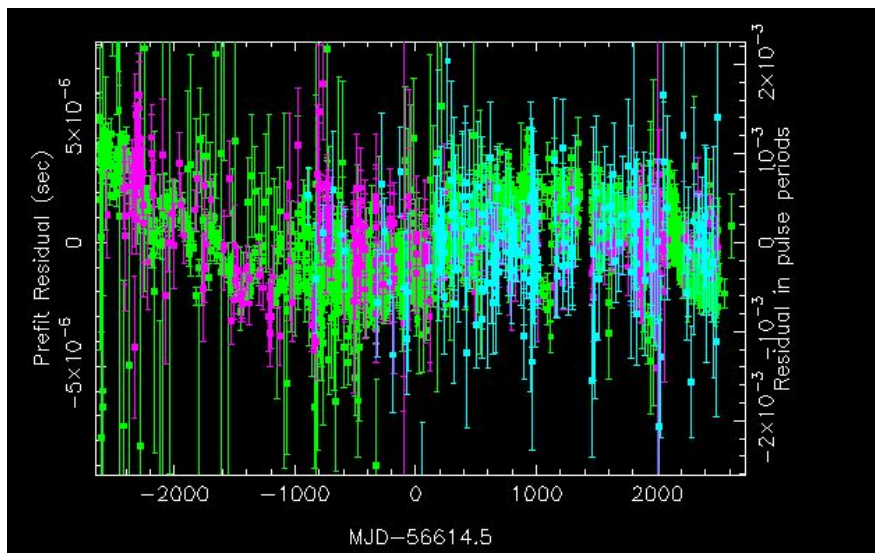
response of the detector

ГВ фон и одиночная ГВ: сравнение

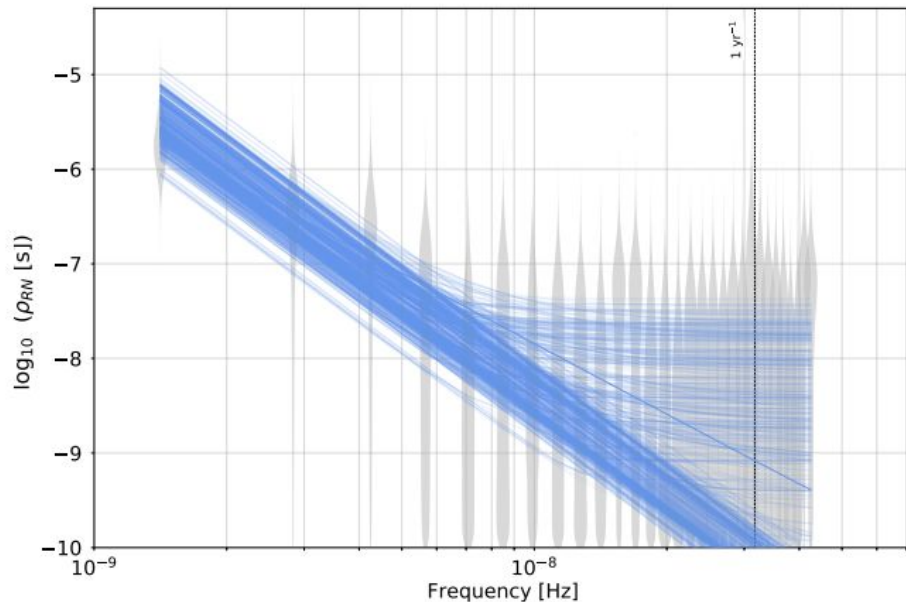


Пульсарный тайминг: трудности

Пульсарные невязки ...

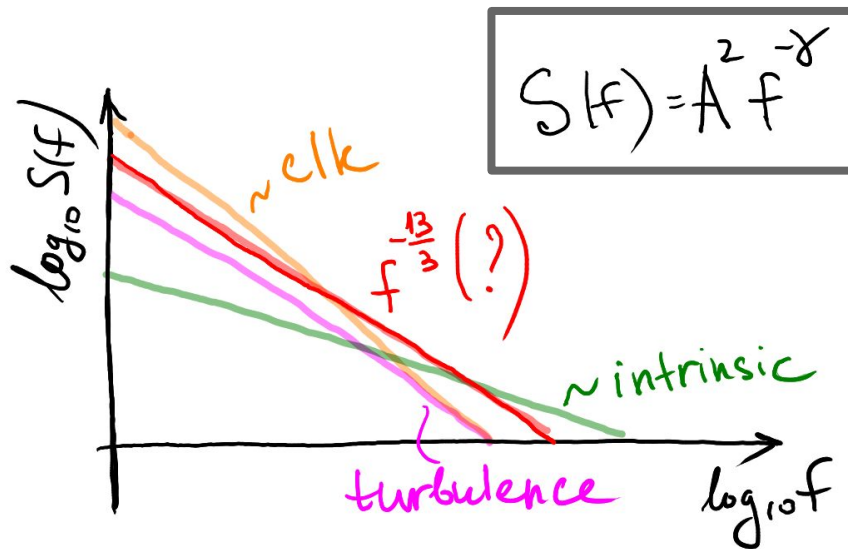
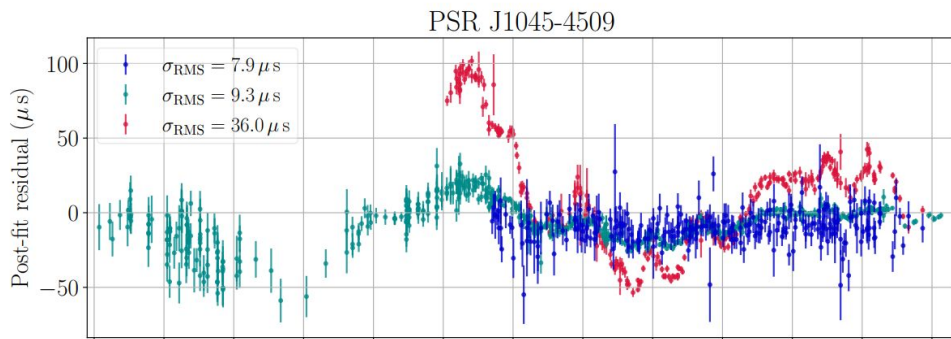


и спектр невязок PSR J0613-0200



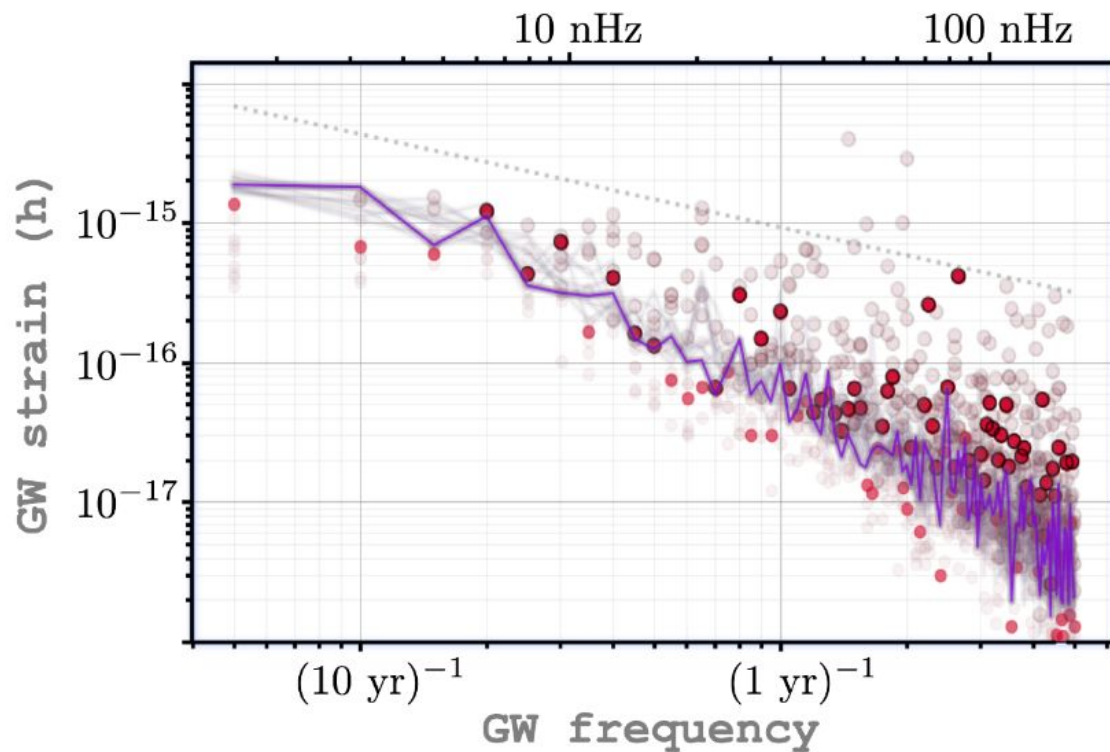
Источники шума в пульсарном тайминге

- Собственный шум пульсара (красный)
- Турбулентная межзвездной среды (красный)
- Шум часов (красный)
- Шум связанный с ошибками эфемерид (красный)
- Инструментальный шум (обычно белый)



Credit: Reardon et al 2021

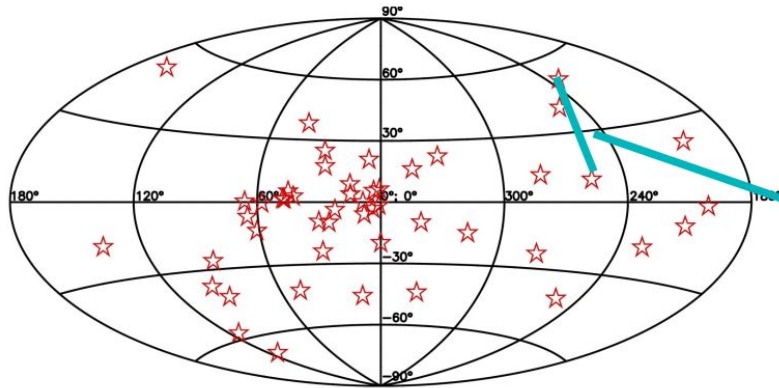
Реалистичные симуляции ГВ фона



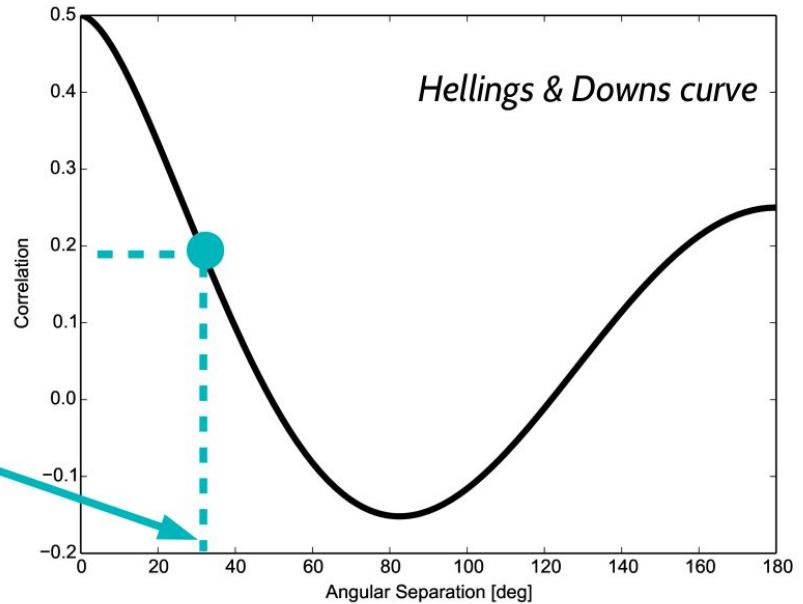
Кривая Хеллингс и Даунс

$$\zeta(\theta_{ij}) = \frac{3}{2} x \log(x) - \frac{x}{4} + \frac{1}{2}$$

$$x = [1 - \cos(\theta_{ij})]$$



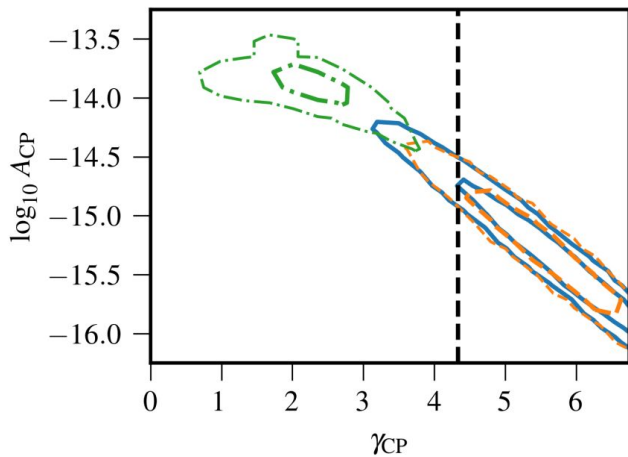
Verbiest+2016



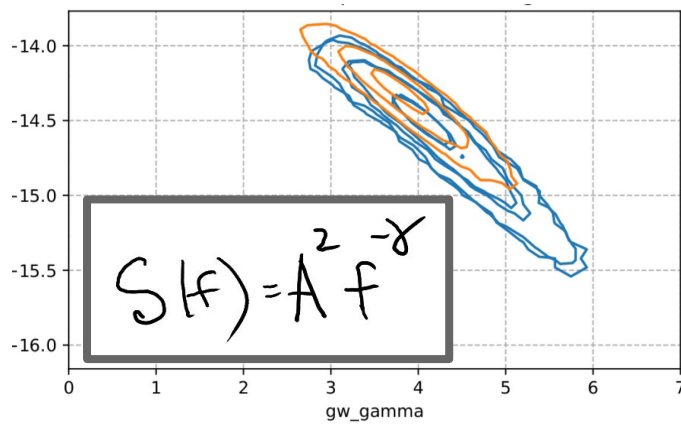
вчера

Пульсарные сети сегодня: общий сигнал

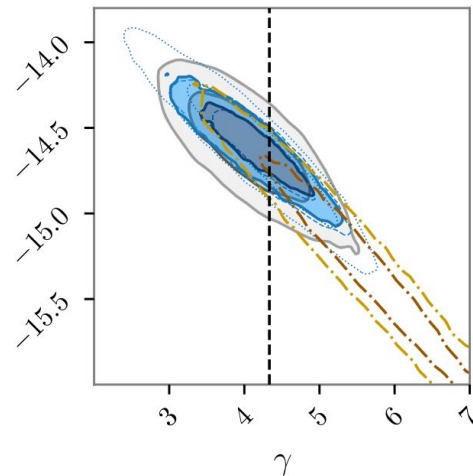
NANOGrav, 2021
12.5 лет, 47 PSRs



EPTA, 2021
24 года, 6 PSRs



PPTA, 2021
14 лет, 26 PSRs



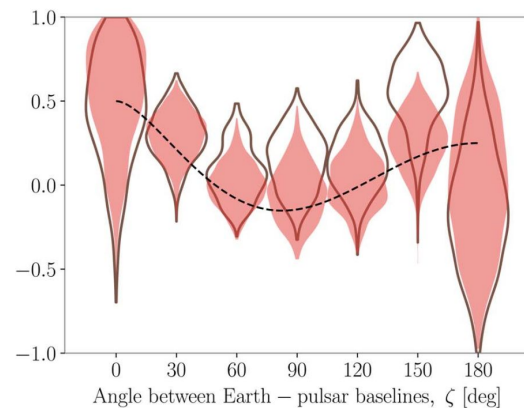
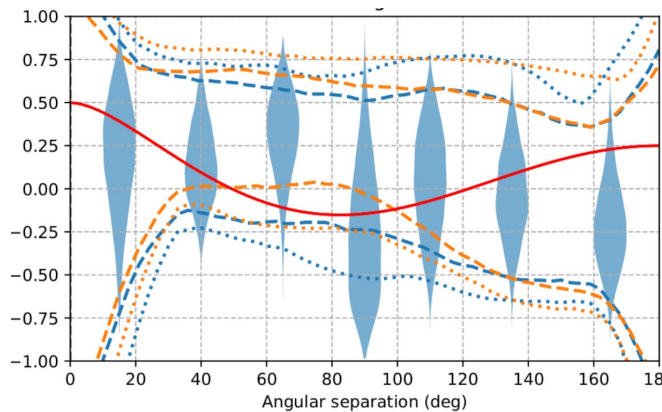
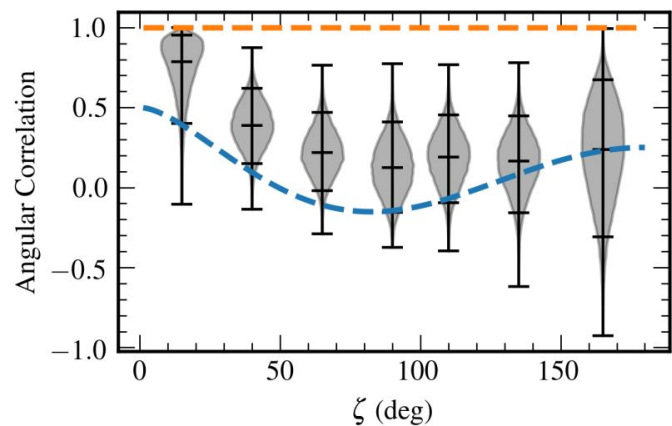
вчера

Пульсарные сети сегодня: общий сигнал

NANOGrav, 2021
12.5 лет, 47 PSRs

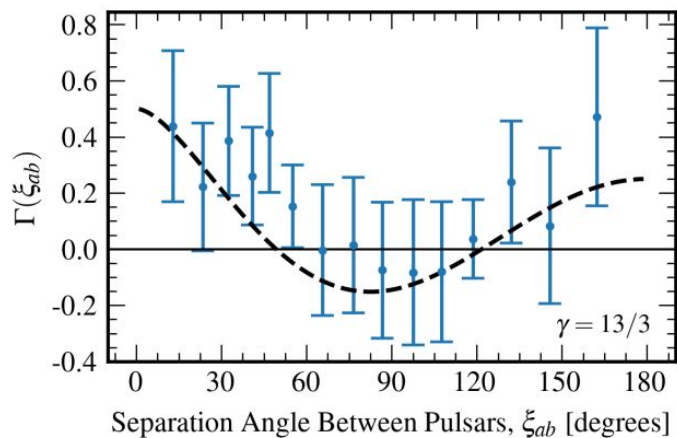
EPTA, 2021
24 года, 6 PSRs

PPTA, 2021
14 лет, 26 PSRs



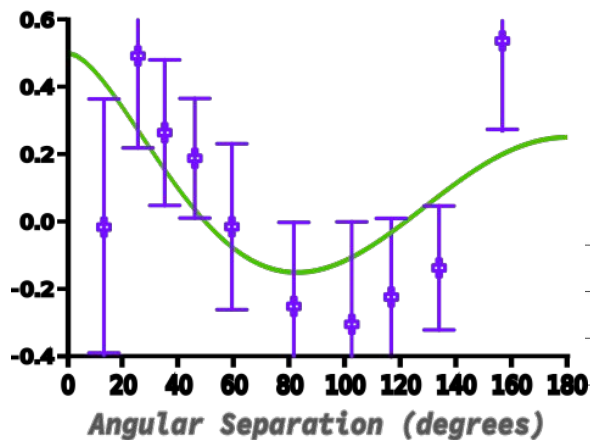
Пульсарные сети сегодня: 28 июня, 2023

NANOGrav, 2023
15 лет, 70 PSRs
 3σ - 4σ



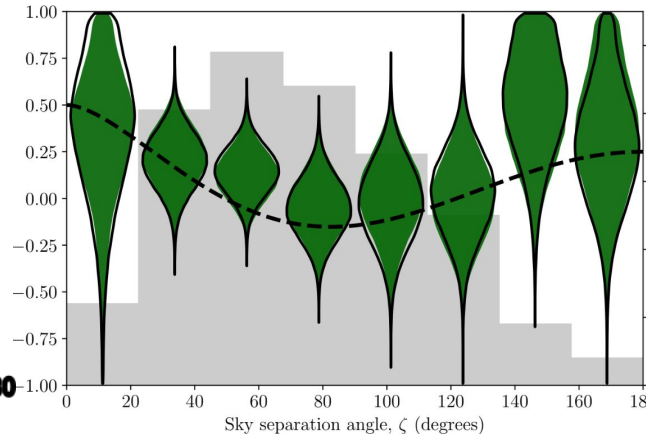
arXiv: 2306.16213

EPTA+InPTA, 2023
10.3 лет, 25 PSRs,
 3σ



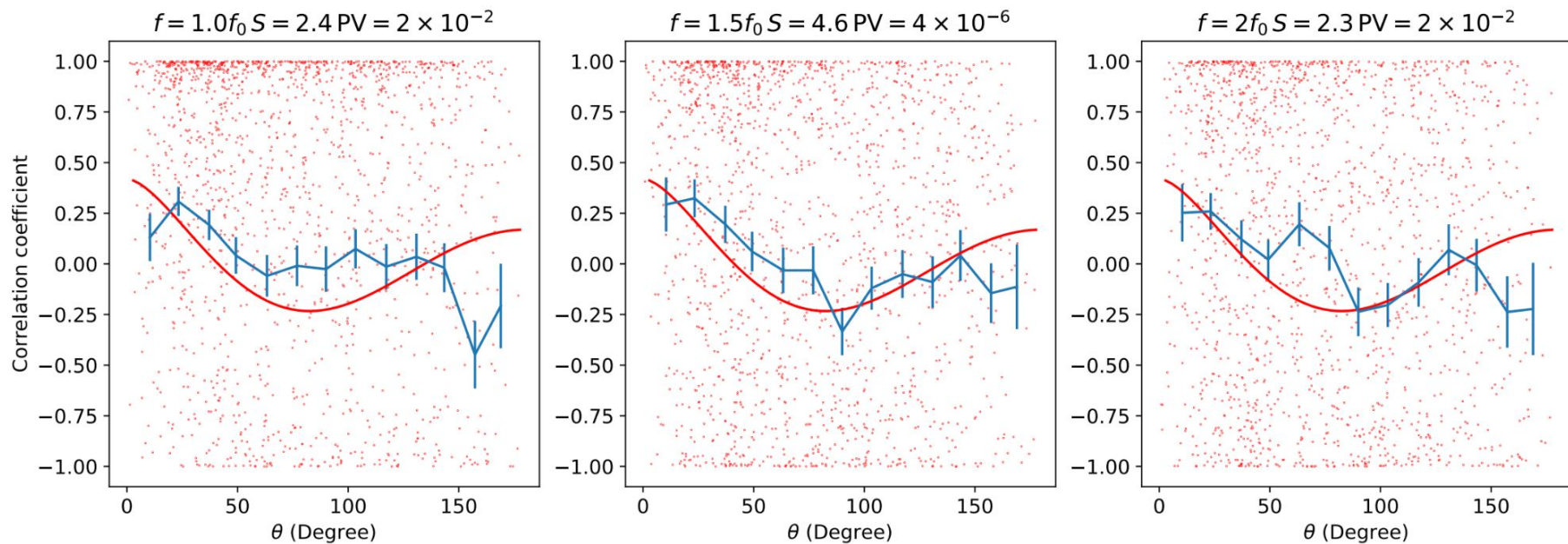
arXiv: 2306.16214

PPTA, 2023
18 лет, 32 PSRs
 2σ

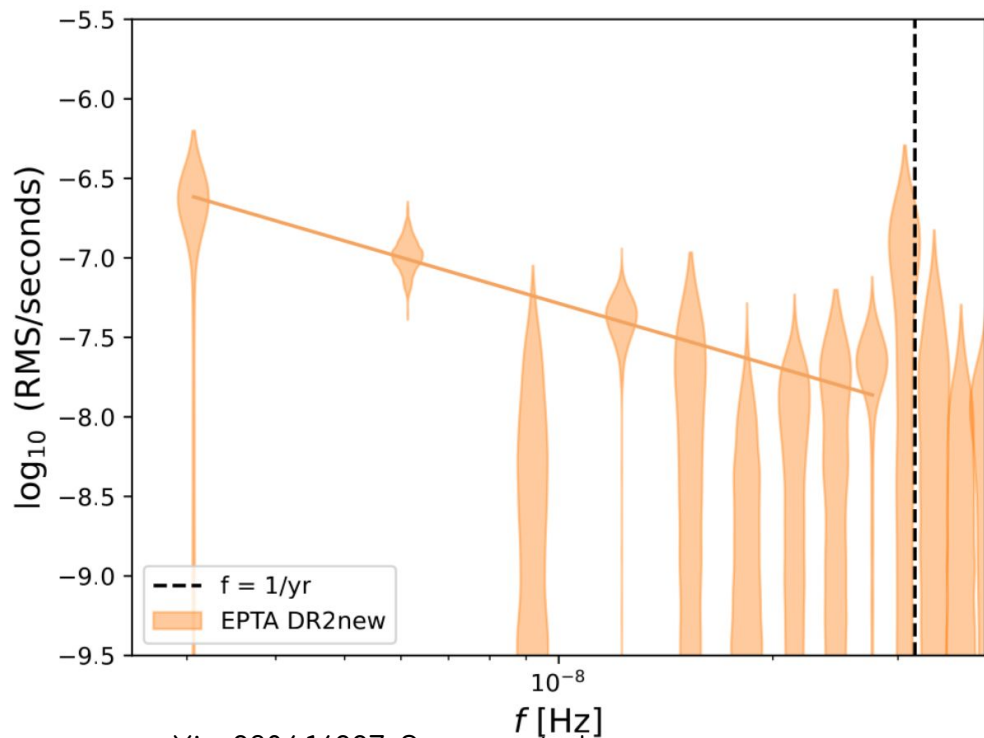


arXiv: 2306.16215

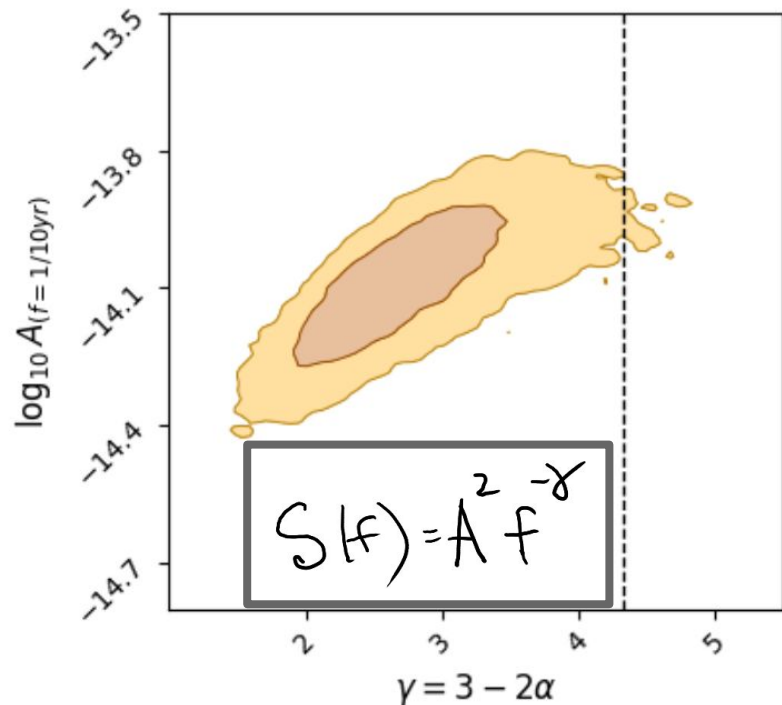
Пульсарные сети сегодня: 28 июня, 2023. Chinese PTA



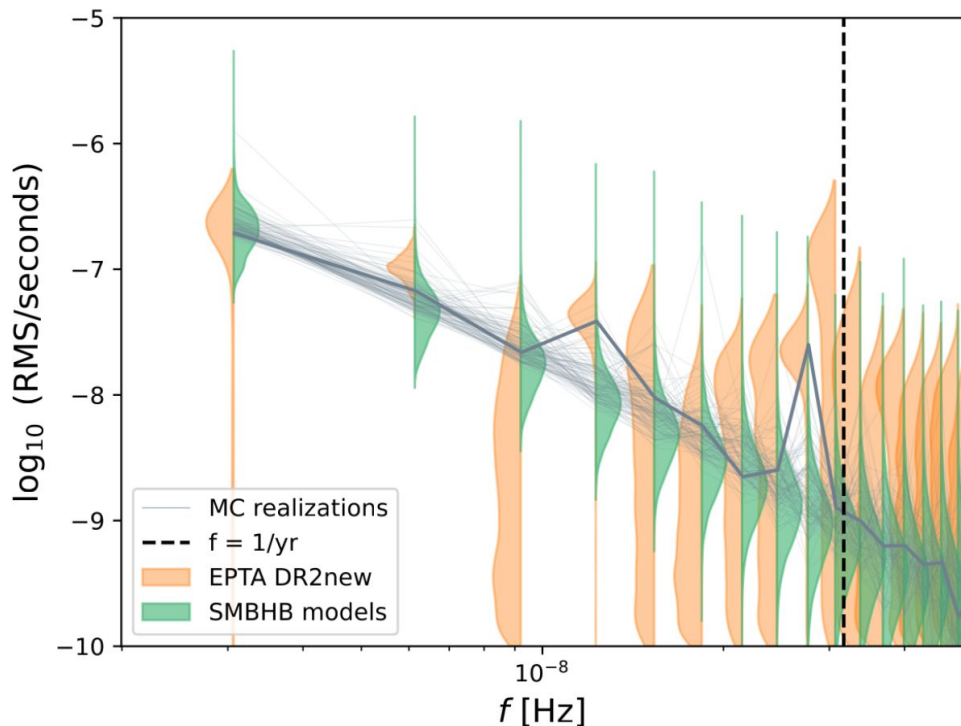
ЕРТА+InРТА: спектральная плотность мощности



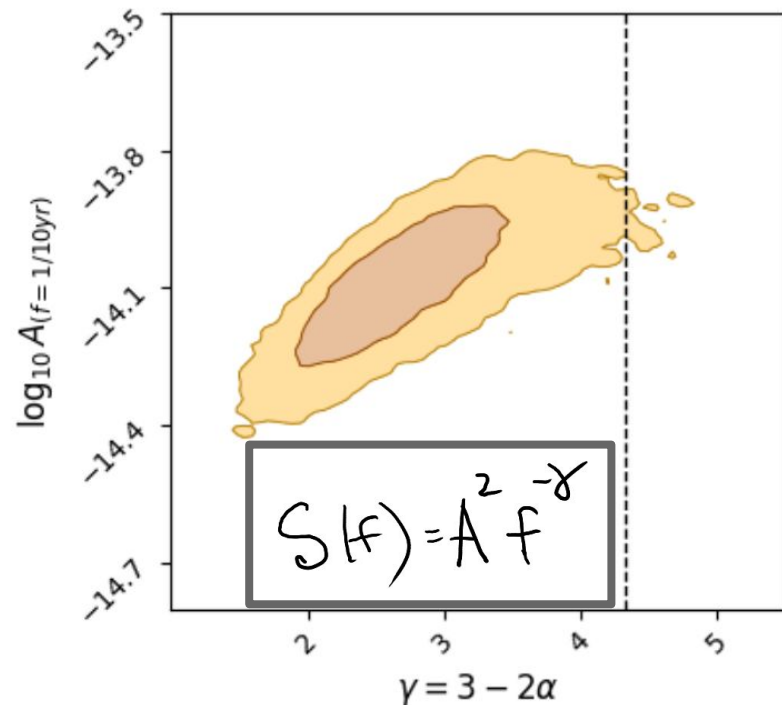
arXiv: 2306.16227: Sesana et al



ERT+InRTA: ГВ фон от популяции ДСЧД

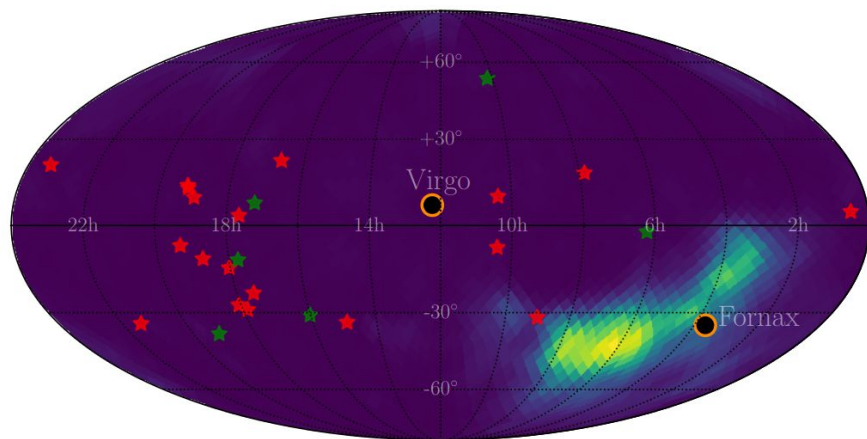


arXiv: 2306.16227: Sesana et al



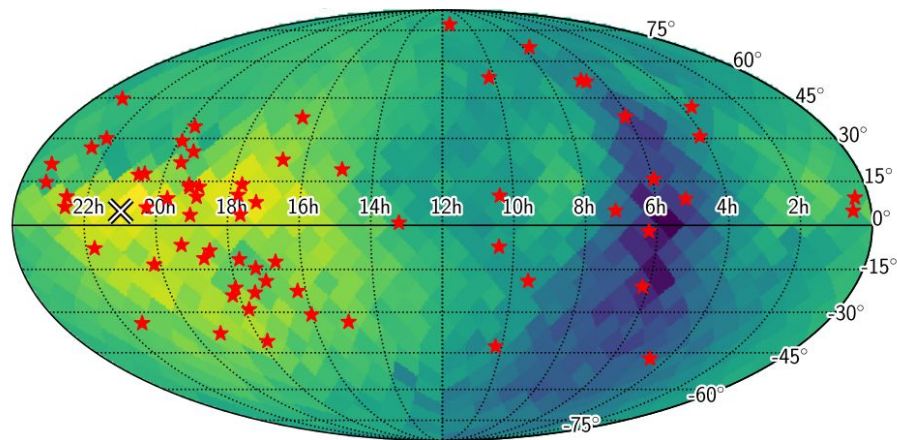
ГВ от яркой ДСЧД

EPTA+InPTA



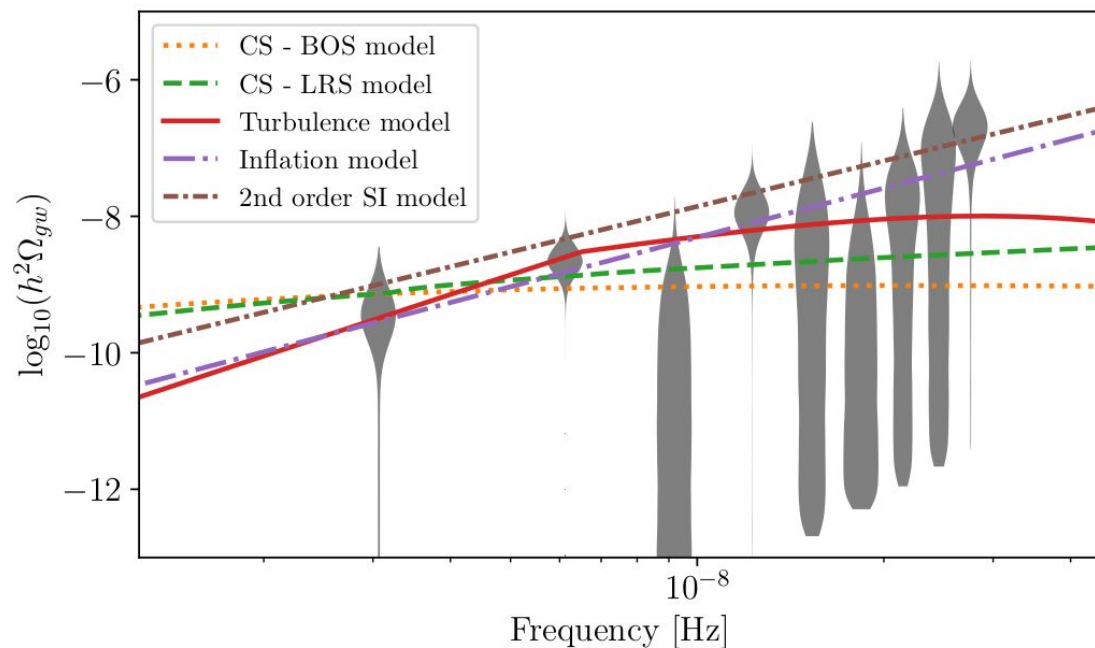
arXiv: 2306.16226 (Falxa, Babak, Speri et al)

NANOGrav

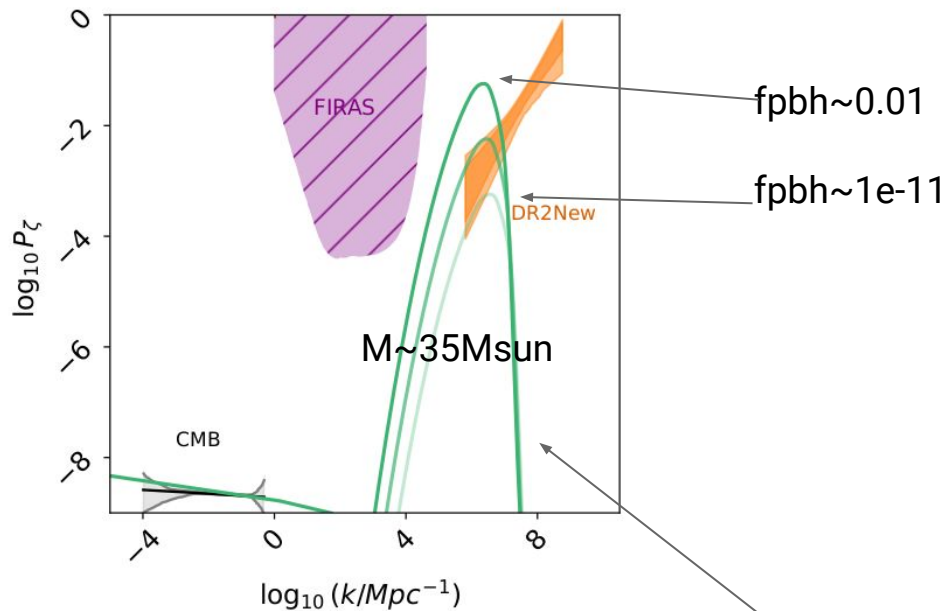
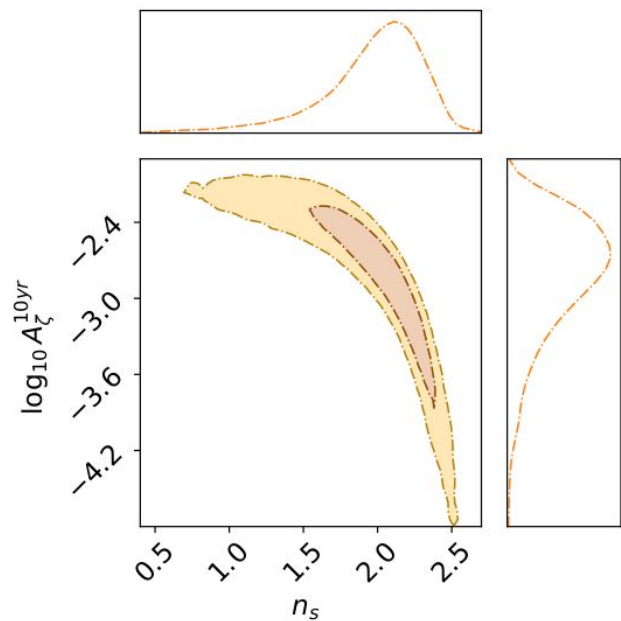


arXiv: 2306.16222

Альтернативные объяснения: ранняя Вселенная

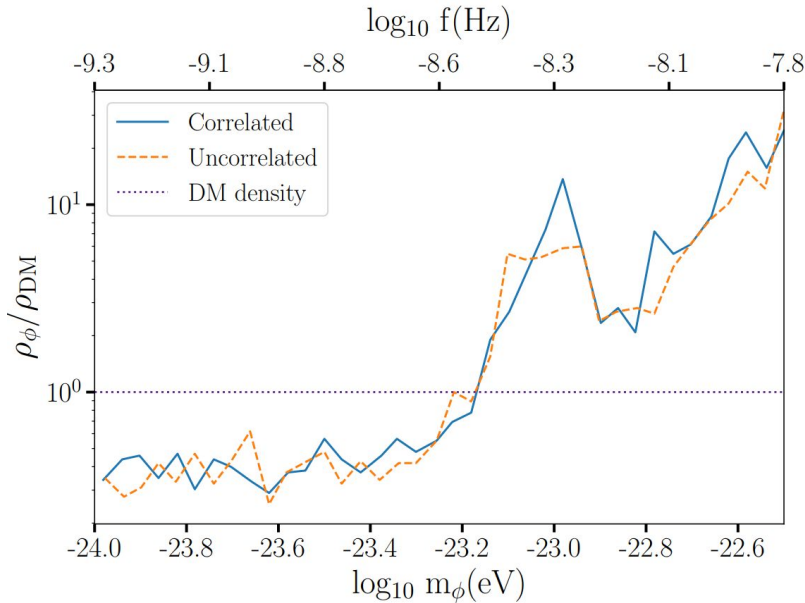


Альтернативные объяснения: ПЧД



Альтернативные объяснения: сверхлегкая скалярная темная материя

Upper limits on the FDM using 25-yr EPTA dataset



Scalar field of the form: *Boson mass*

$$\varphi(x,t) = A(x) \cos(mt + d(x))$$

Energy-momentum tensor:

$$T_{\mu\nu} = \partial_\mu \varphi \partial_\nu \varphi - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} ((\partial\varphi)^2 - m^2 \varphi^2)$$

To the first order v/c

$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} P = \frac{1}{2} m^2 A^2 & & & \\ & P & & \\ & & P & \\ & & & P \cos(2mt) \end{pmatrix} \xrightarrow{\delta T_{\mu\nu} = G_{\mu\nu}} g_{\mu\nu}(t) = \begin{pmatrix} \varphi(t) & & & \\ & -\varphi(t) \sim \cos(2mt) & & \\ & & -\varphi(t) & \\ & & & -\varphi(t) \end{pmatrix}$$

The final expression for the perturbed timing residuals

$$R(t) = \underbrace{\frac{\psi(x_e)}{2\pi f} \sin(2\pi f t + d(x_e))}_{\text{Earth term}} - \underbrace{\frac{\psi(x_p)}{2\pi f} \sin(2\pi f (t - \frac{D}{c}) + d(x_p))}_{\text{Pulsar term}}$$

~ rho_DM (pointing to the Earth term)

$\frac{2mc^2}{h} = 5 \cdot 10^8 \left(\frac{m}{10^{-22} \text{eV}} \right) \text{Kz}$ (pointing to the frequency f in the Earth term)

Будущее пульсарных сетей (мое мнение)

Объединение данных всех пульсарных сетей

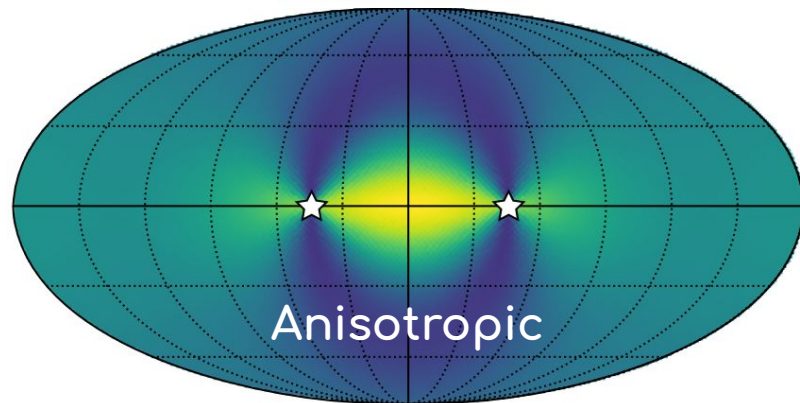
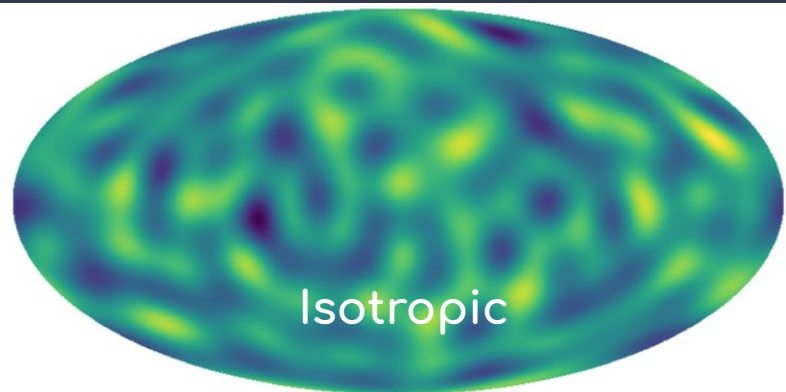
EPTA, PPTA, NANOGrav + MeerKAT + CPTA

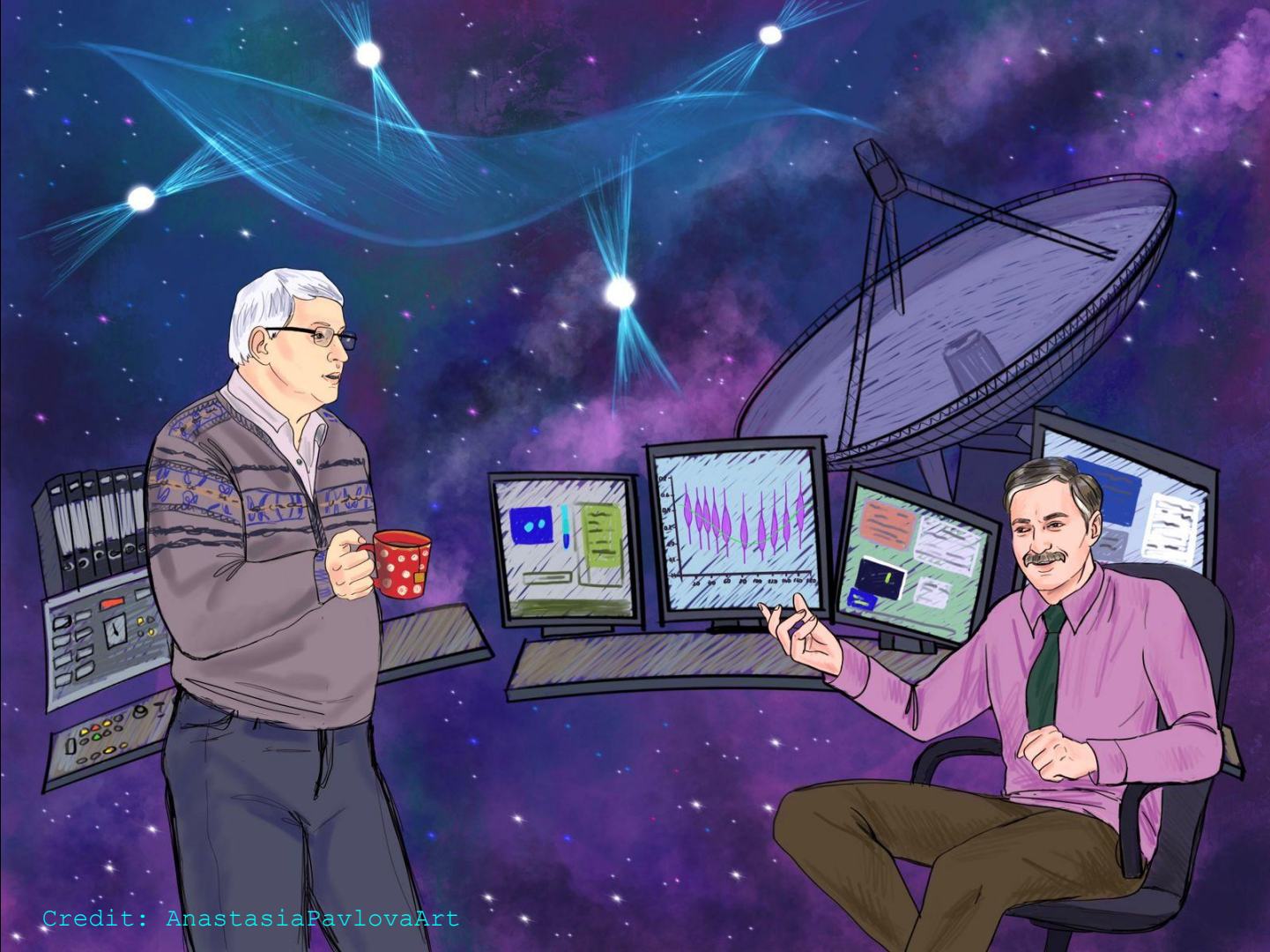
Оптимизация алгоритмов обработки данных

Только для 25 пульсаров EPTA один запуск занимает около 4 дней счета на кластере

Достоверное распознавание природы сигнала

Анизотропия, поляризация ?





Credit: AnastasiaPavlovaArt

Комментарии/ответы на вопросы

1. Учёт эксцентриситета

Просто копирую сюда ответ Альберто Сезана

For that type of simulation you can just consider quadrupolar order and differen harmonics. I think the code Just implements that. It's essentially eq 9 here

<https://arxiv.org/pdf/0910.1587.pdf>

this is sufficient to construct proxies for the $h_c(f)$ and have an idea of the spectrum in th frequency domain.

Conversely, for injecting sources in real PTA data in the time domain, in my code I have an adaptation of the Barack & Cutler waveforms that go to some PN order. The paper is Barack & Cutler 2004.

Alberto

Комментарии/ответы на вопросы

2. Число двойных

На картинке, которую показывала, кружками были показаны самые яркие двойные в каждом частотном окне (не все двойные в каждом частотном окне). Сильная загруженность графика в области высоких частот объясняется (Галина правильно сказала) выбранной логарифмической шкалой.

Прикладываю график числа источников, как функция частоты. Число источников уменьшается с ростом частоты.

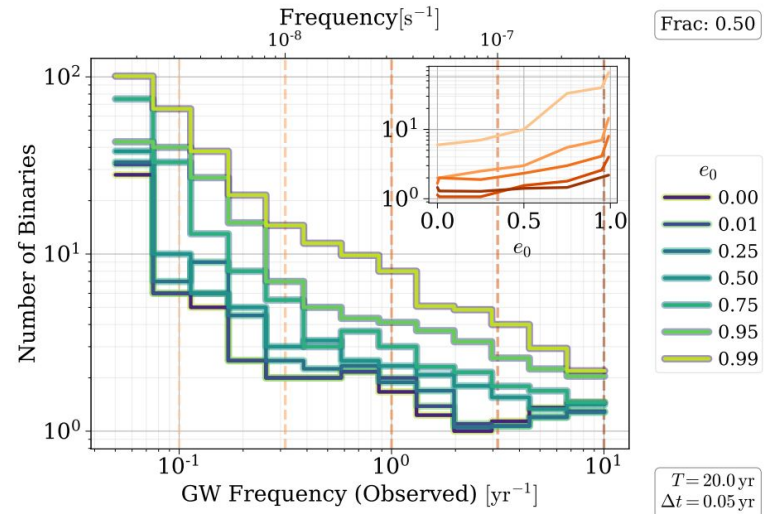


Figure 6. Number of binaries contributing 50% of the GW energy for each eccentricity model. The inset shows the trends versus eccentricity at each of the orange highlighted frequencies. As eccentricity increases, the number of contributing systems increases and the drop-off at higher frequencies becomes more gradual.

Комментарии/ответы на вопросы

3. ГВ из астрометрии

Использование Gaia для поиска стохастического фона: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...861..113D/abstract>

Диапазон чувствительности 6×10^{-18} - 1×10^{-9} Hz (несколько ниже, чем у пульсарного тайминга). Верхняя оценка на плотность ГВ на 4-5 порядков хуже, чем из пульсарного тайминга.

Также прилагаю статью по возможности измерения ГВ от индивидуальных источников.

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022ApJ...933...76D/abstract>

Комментарии/ответы на вопросы

3. Энергия ГВ

Здесь несколько сложнее, чем я думала. Я так понимаю, что вопрос был именно про подсчет энергии за период обращения для индивидуальной двойной ЧД. Такой подсчет можно произвести, но он будет чрезвычайно грубым. Дело в том, что в отличие от LIGO у нас нет достоверного знания ни о расстоянии до двойной, ни о массе компонент (на самом деле, там почти 100% вырождение по этим двум параметрам).