

Исследование влияния параметров мультиплечевого детектора на измерения пространственной корреляции пульсарных сетей

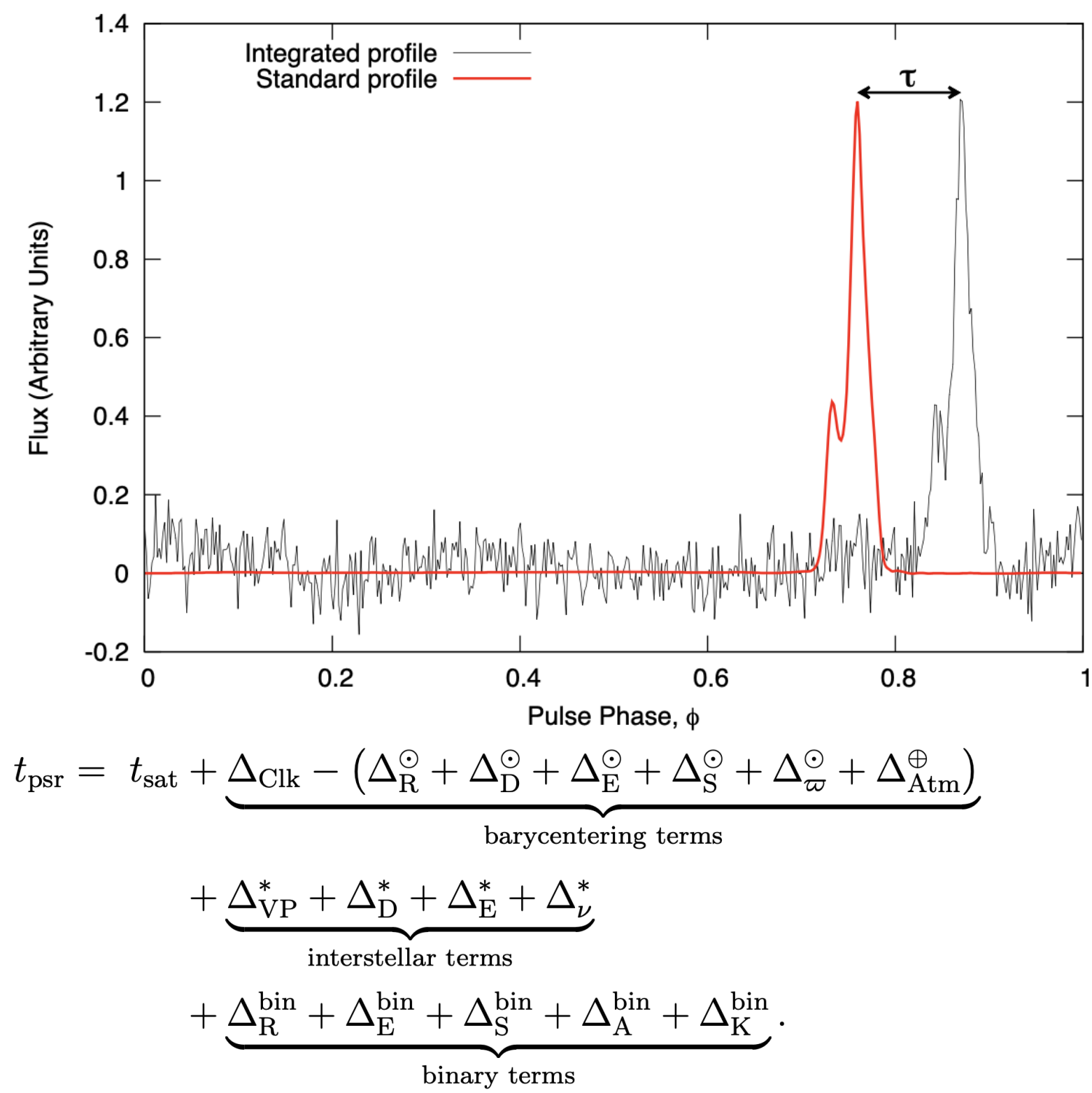
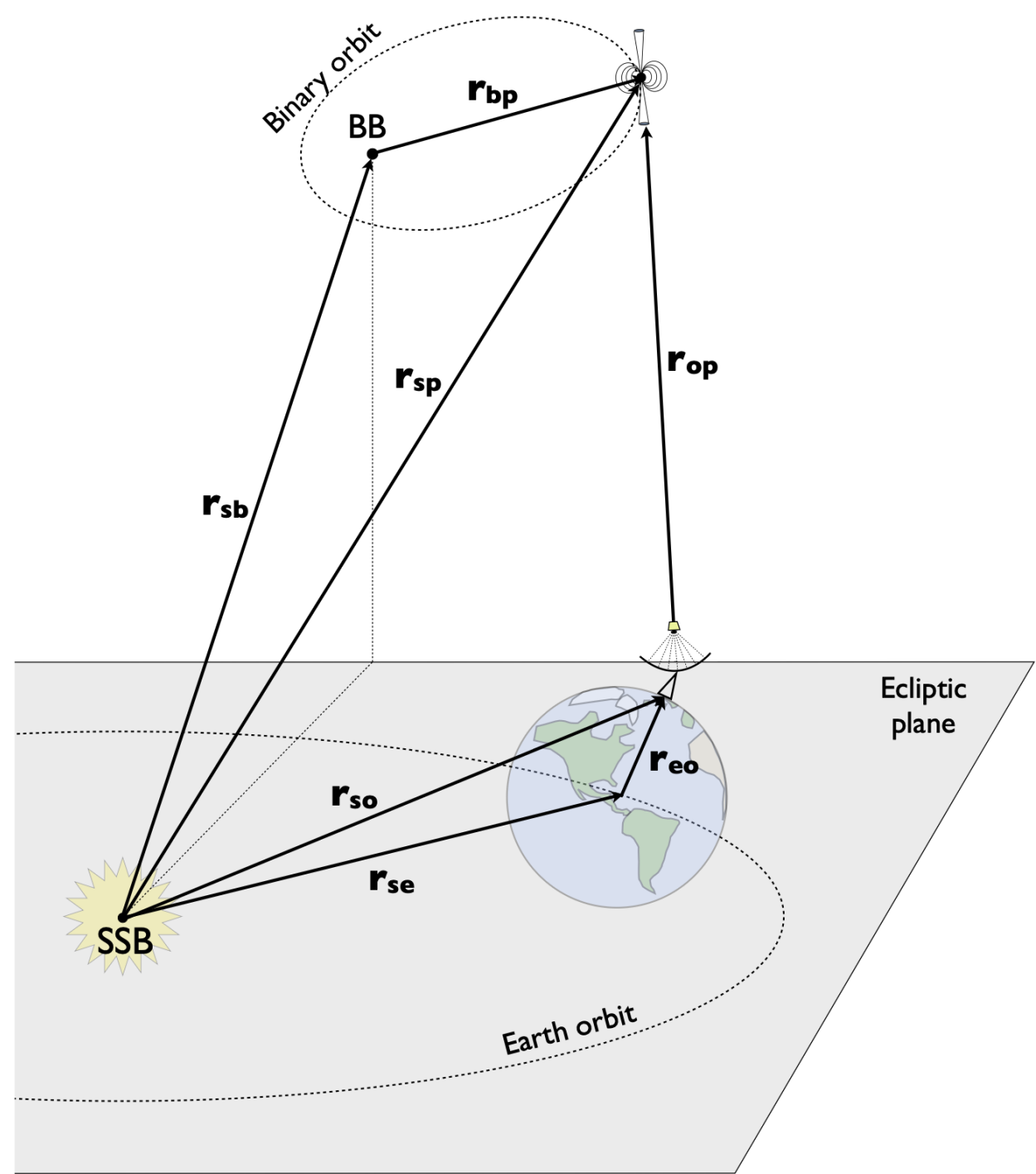
М. Д. Игнатов¹, Н. К. Порайко^{1,2}, К. А. Постнов^{1,3}

¹Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Университетский просп. 13, Москва, 119234, Российская Федерация
²Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Auf dem Hügel 69, Bonn, 53121, Germany
³Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская 18, Казань, 420008, Российская Федерация



magnat2k3@yandex.ru

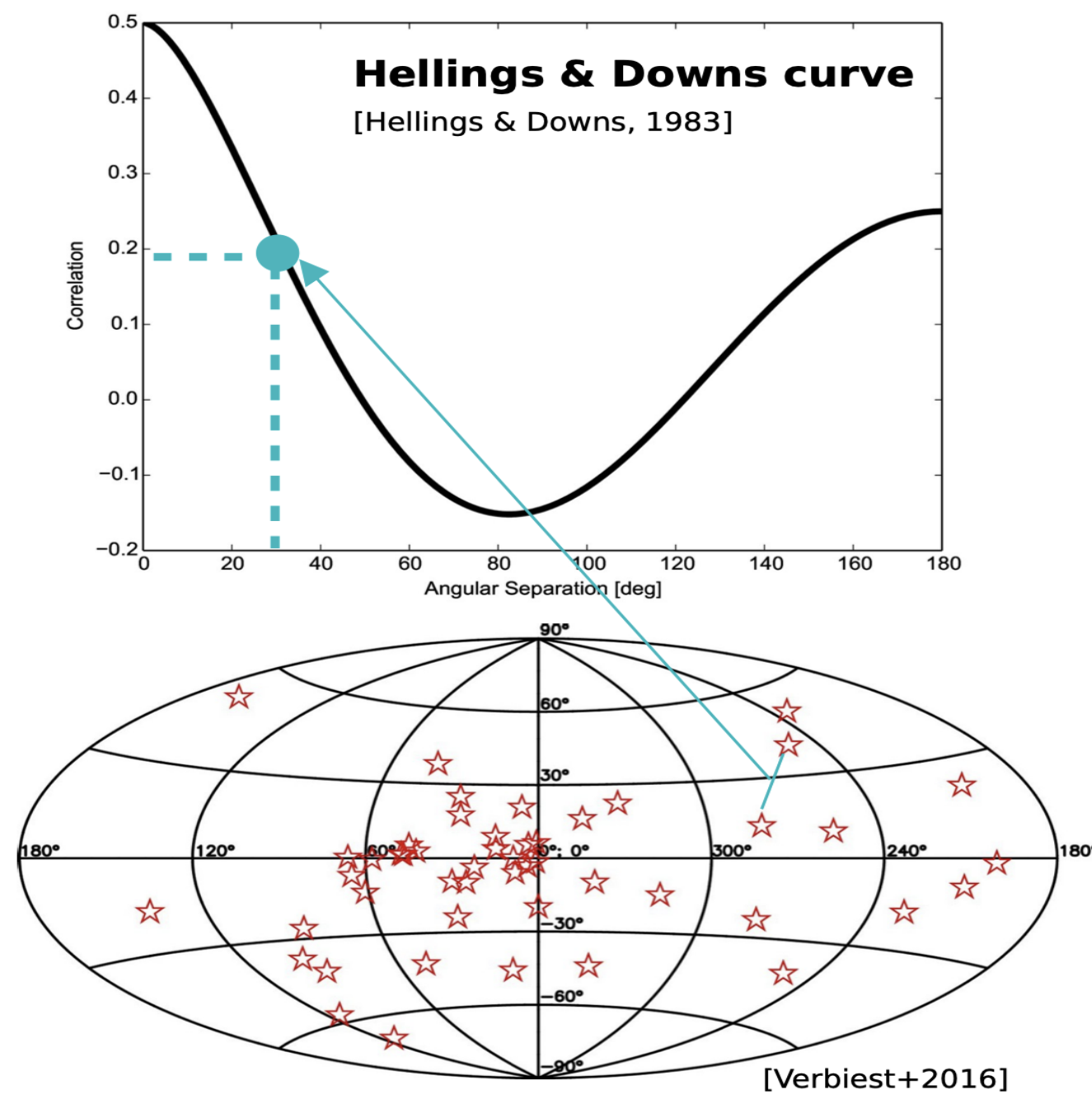
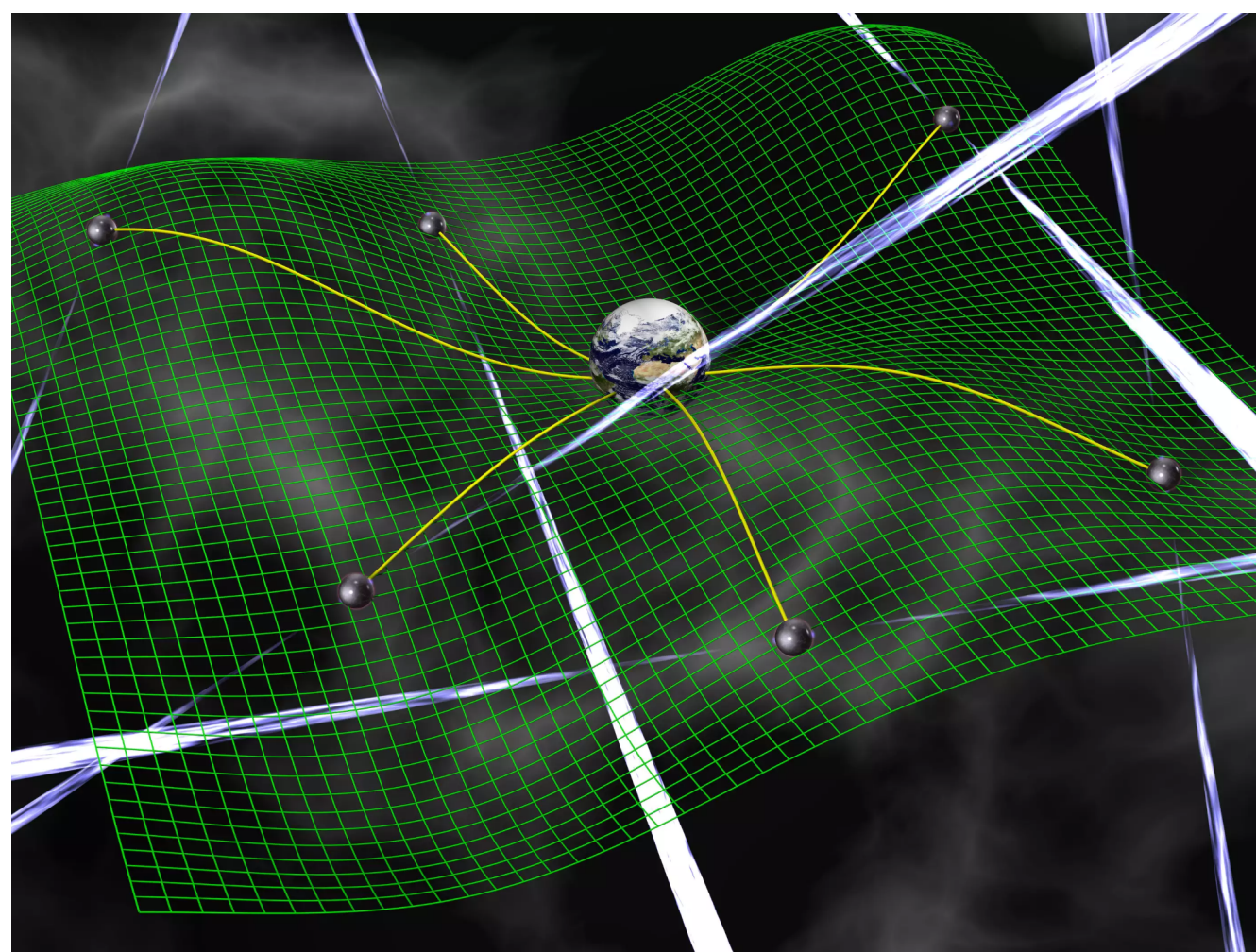
Пульсарный тайминг — это процедура получения остаточных уклонений топоцентрических моментов прихода импульсов от пульсаров согласно полной модели взаимного движения источника (пульсара) и детектора (радиотелескопа) на земле с учётом эффектов, происходящих в двойной системе, в Солнечной системе и в межзвёздной среде. Метод был предложен С. Детвейлером (1979) и М. В. Сажиным (1978). Над подобными измерениями работают несколько больших коллабораций пульсарных сетей, такие как Европейская пульсарная сеть (EPTA), Международная пульсарная сеть (IPTA), сеть «Паркс»(PPTA) и другие. Процедура тайминга сопровождается получением интегрального и стандартного профиля пульсара и нахождением задержек моментов прихода импульсов (МПИ) между ними (остаточные уклонения).



Почему нужны большие пульсарные сети?

Основным сигналом, который мы хотели бы задетектировать с помощью пульсаров, является гравитационно-волновой (ГВ) сигнал от двойных систем сверхмассивных чёрных дыр (СМЧД). Остаточные уклонения могут иметь различный внешний вид, однако, интересующий нас сигнал (ГВ от одиночного источника) должен иметь общие характеристики сразу в данных всех пульсаров — быть пространственно скоррелированным. В результате присутствует теоретически ожидаемая корреляция, описываемая кривой Хеллингса и Даунса (1983).

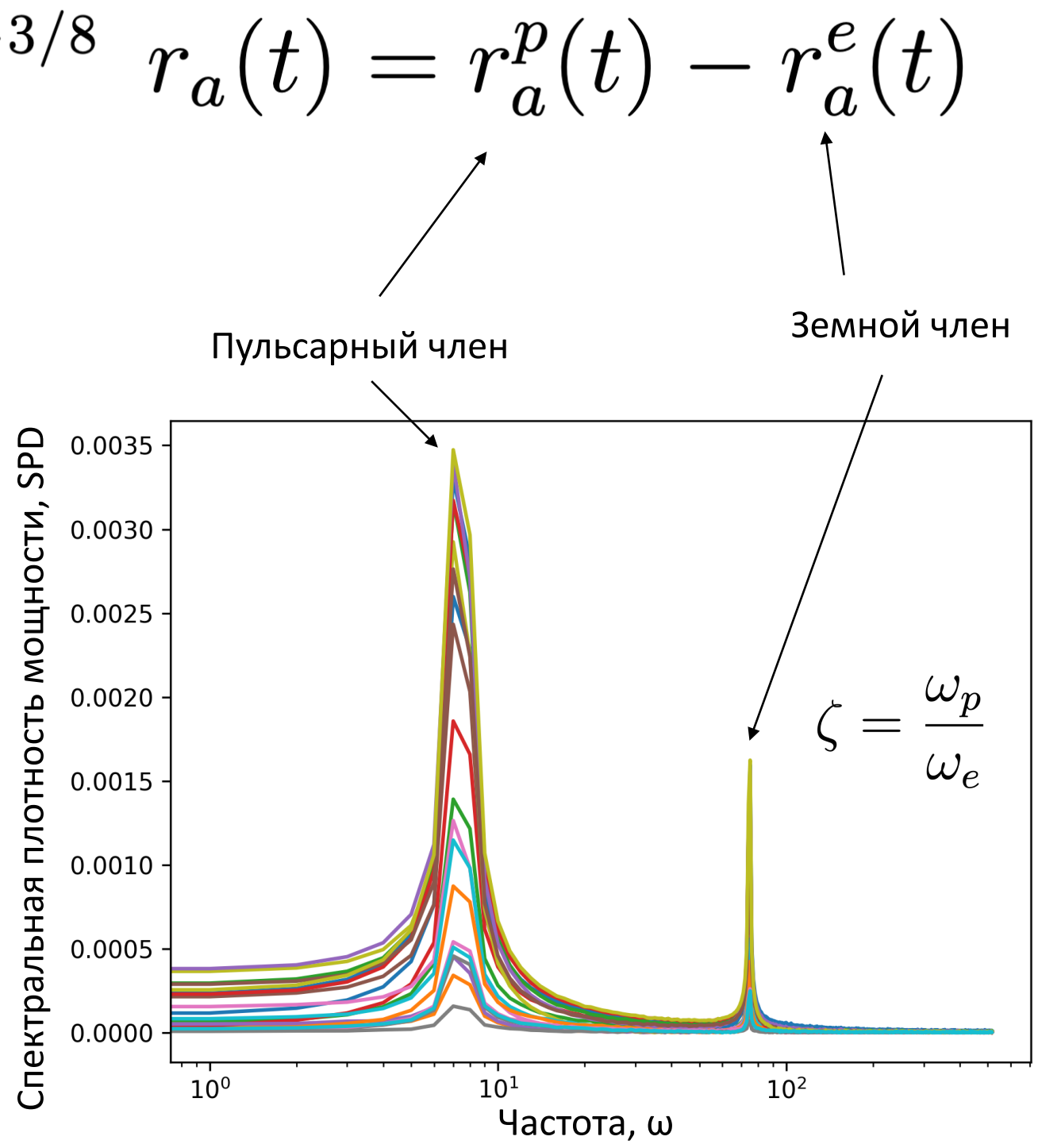
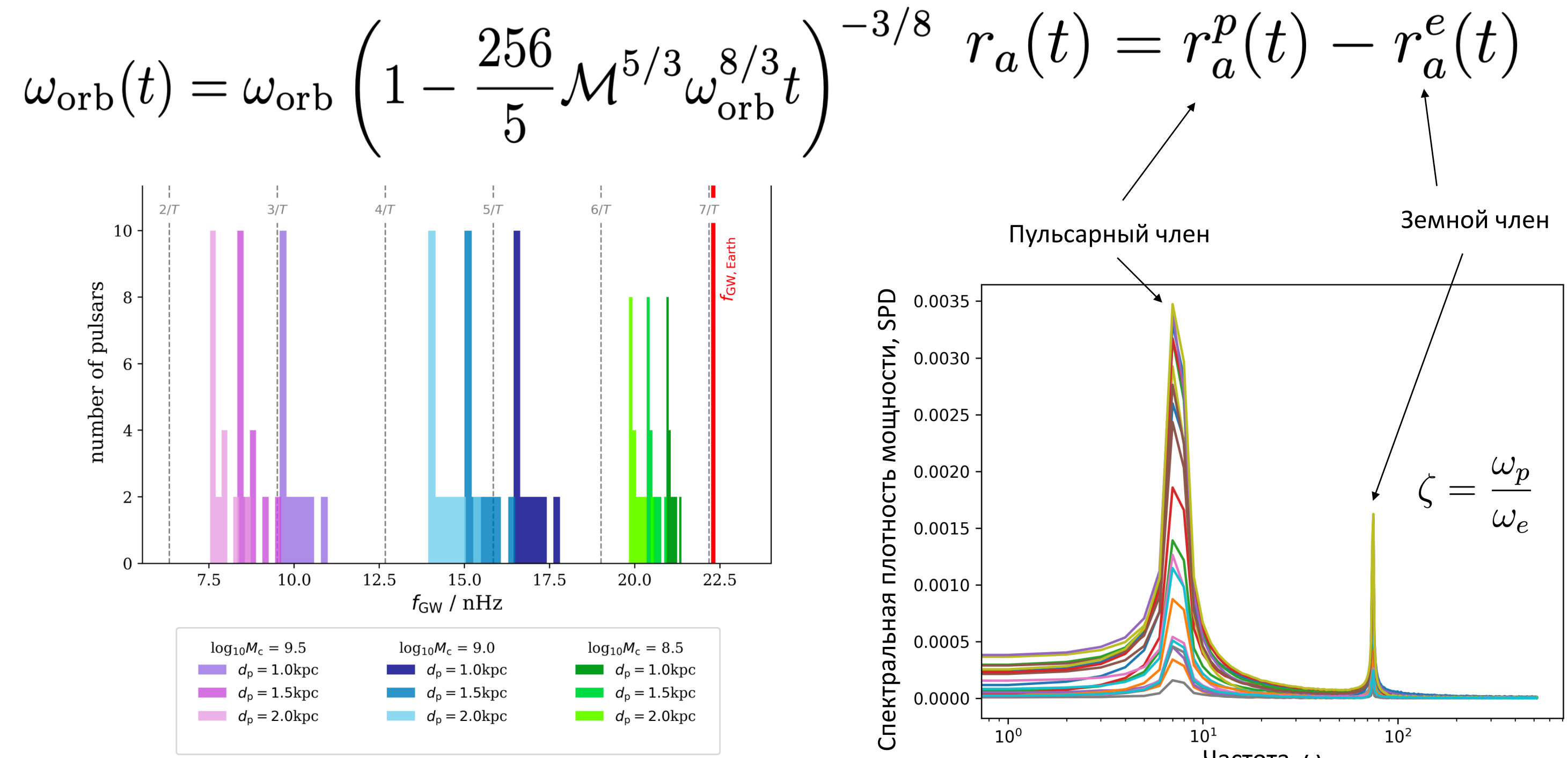
$$\Gamma_{ab} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1 - \cos(\theta_{ab})}{2} \cdot \log \left[\frac{1 - \cos(\theta_{ab})}{2} \right] - \frac{1}{4} \cdot \frac{1 - \cos(\theta_{ab})}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \delta_{ab}$$



Проверенные гипотезы

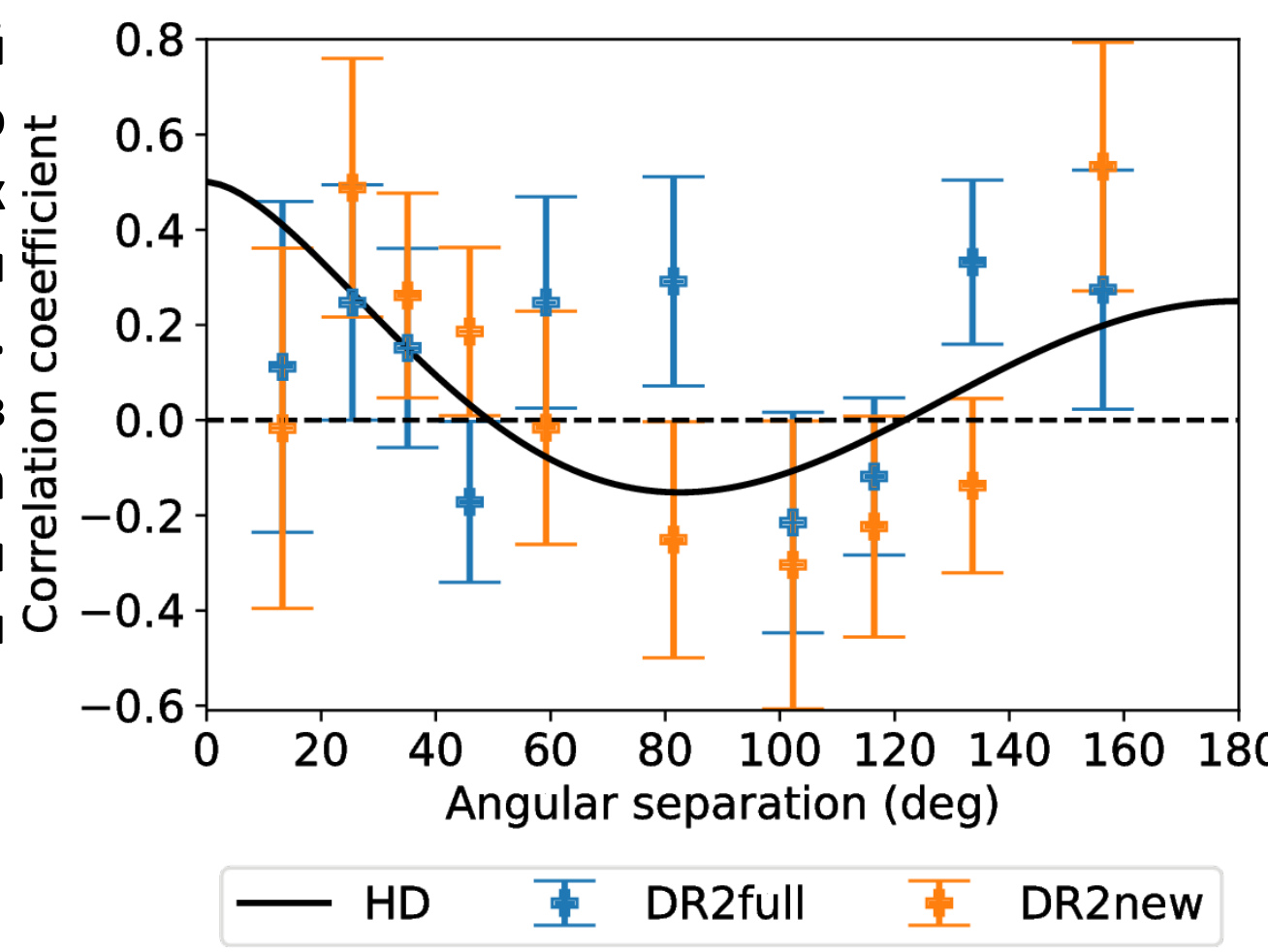
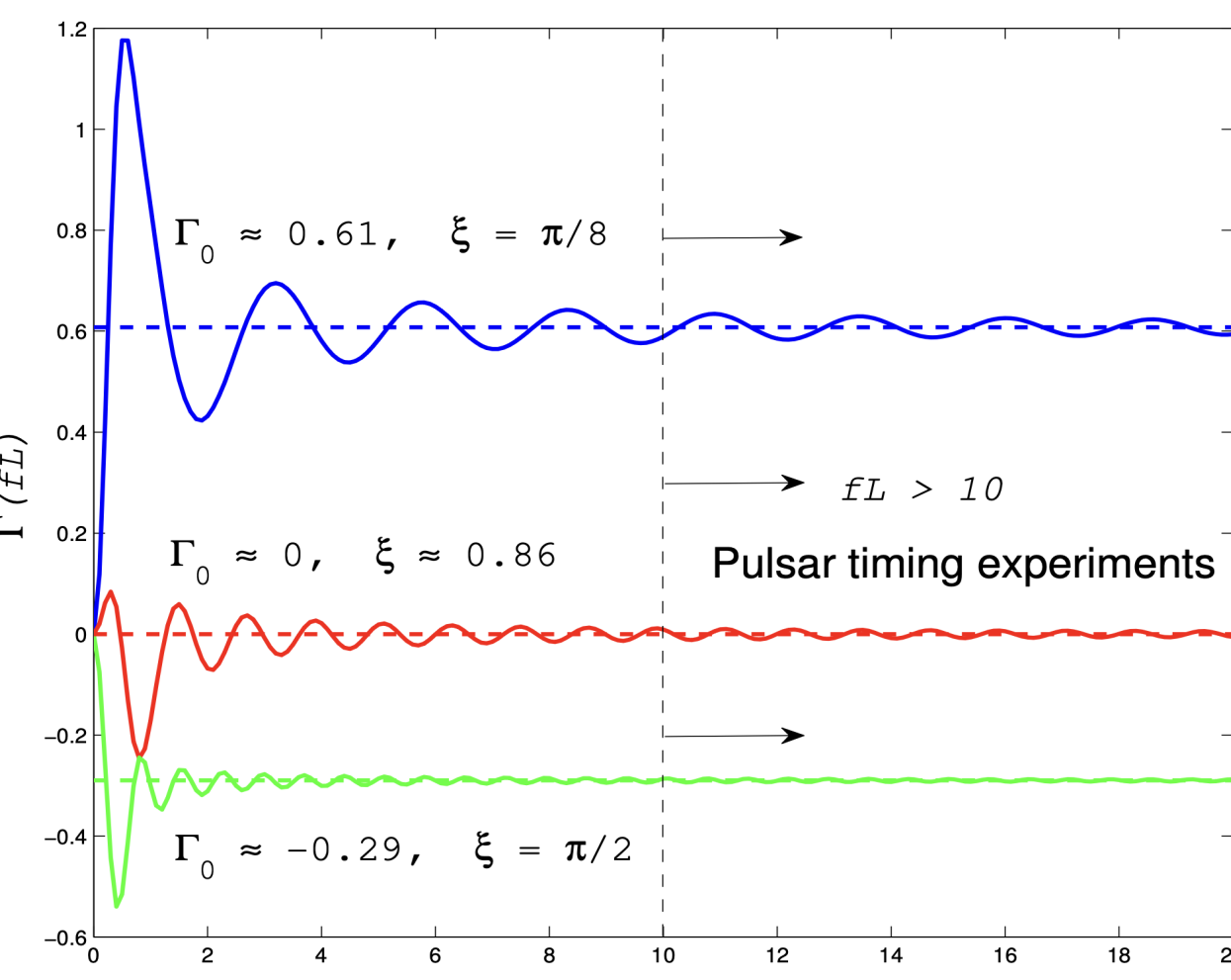
ζ-гипотеза

Основным источником моделируемого ГВ-сигнала, являются двойные системы СМЧД. В приближении круговых орбит, угловая частота обращения таких систем растёт со временем по формуле ниже из работы Babak et al. (2015) Так как частота ГВ-излучения вдвое больше орбитальной частоты обращения системы, то и ГВ будут постепенно менять свою частоту. Обозначим вклад взаимодействия ГВ-излучения на сигнал от пульсара вблизи пульсара как пульсарный член, а вклад от взаимодействия ГВ-излучения на пульсарный сигнал вблизи Земли как земной член. Источник ГВ-излучения будет со временем эволюционировать, что в конечном счёте приведёт к тому, что угловые частоты у пульсарного и земного члена будут разными ($t=L/c$, где L - расстояние до пульсара). Пульсары расположены на разных расстояниях и, соответственно, пульсарный член будет попадать на разные угловые частоты. Если частоты пульсарного и земного члена совпадают, то они будут складываться когерентно, что будет приводить к размытию кривой ХД (т.к. фаза пульсарного члена случайна). Обозначив через ζ отношение угловых частот, определим, как влияет вклад ближних и дальних пульсаров на значимость кривой Хеллингса-Даунса (ХД).



fL-гипотеза

Одной из основных коллабораций пульсарных сетей является Европейская пульсарная сеть (EPTA). По данным, полученным EPTA на разных временных отрезках были построены кривые ХД. Справа кривая построенная по данным за последние 10 и 25 лет. Оранжевые точки — наблюдательные данные, релиз 2023 год, значимость $3.5\sigma < 5\sigma$, синие — по данным за последние 25 лет. Чёрным цветом обозначена кривая ХД построенная по аналитической формуле из работы Хеллингса и Даунса (1983).

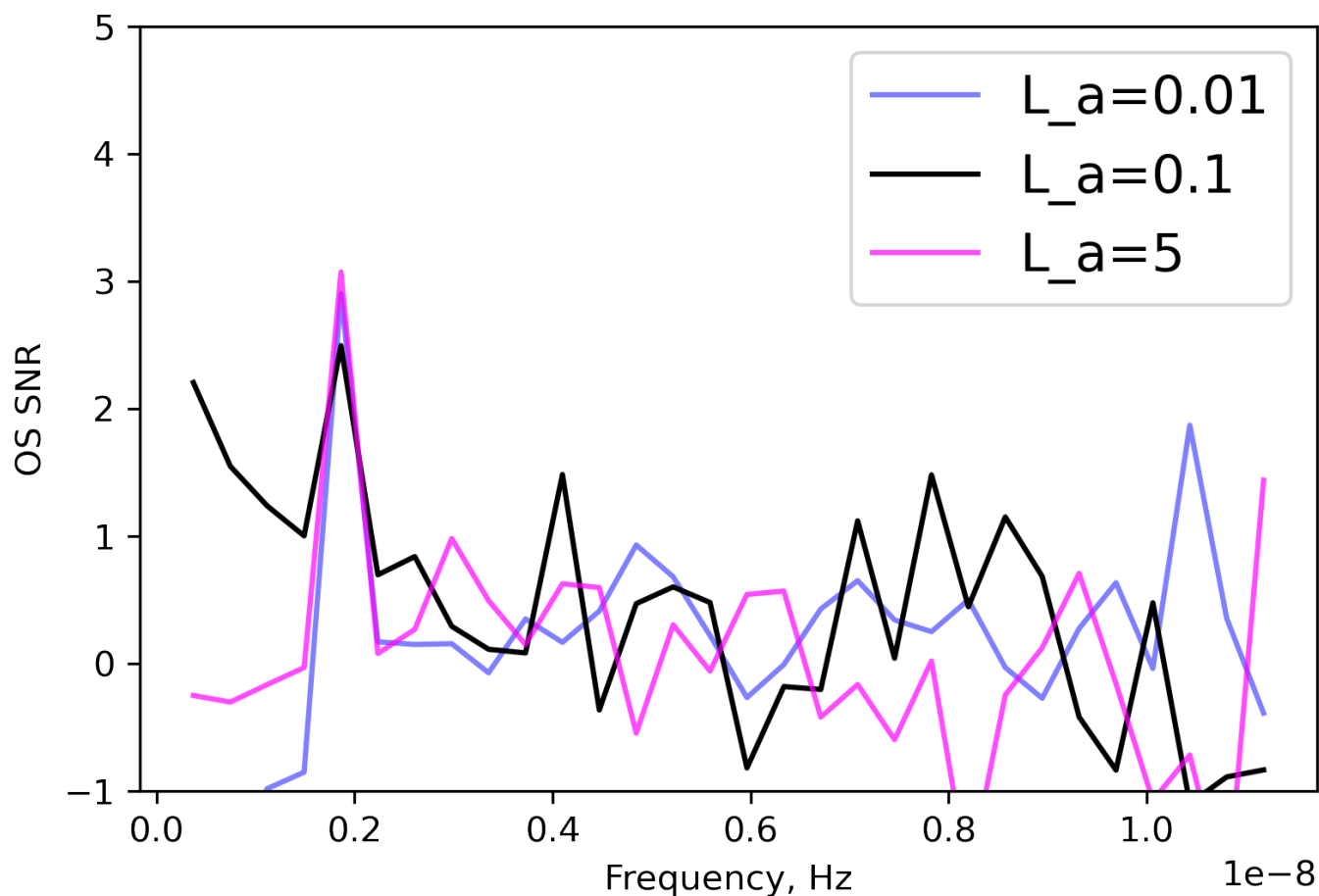


Вторая гипотеза была попыткой объяснить разладку кривой ХД в зависимости от полного времени наблюдения. В работе Anholm et al (2009) было найдено аналитическое приближение для передаточной функции сигнала между двумя пульсами: формула снизу под графиком. В показателе экспоненты стоит выражение зависящее от произведения частоты гравитационной волны (f) на расстояние до пульсара (L). В работе Anholm et al (2009) было показано, что интеграл может быстро осциллировать при малых значениях произведения fL. Данное выражение сходится к ХД при $fL > 10$. В данной части работы мы исследовали разладку ХД при малых fL.

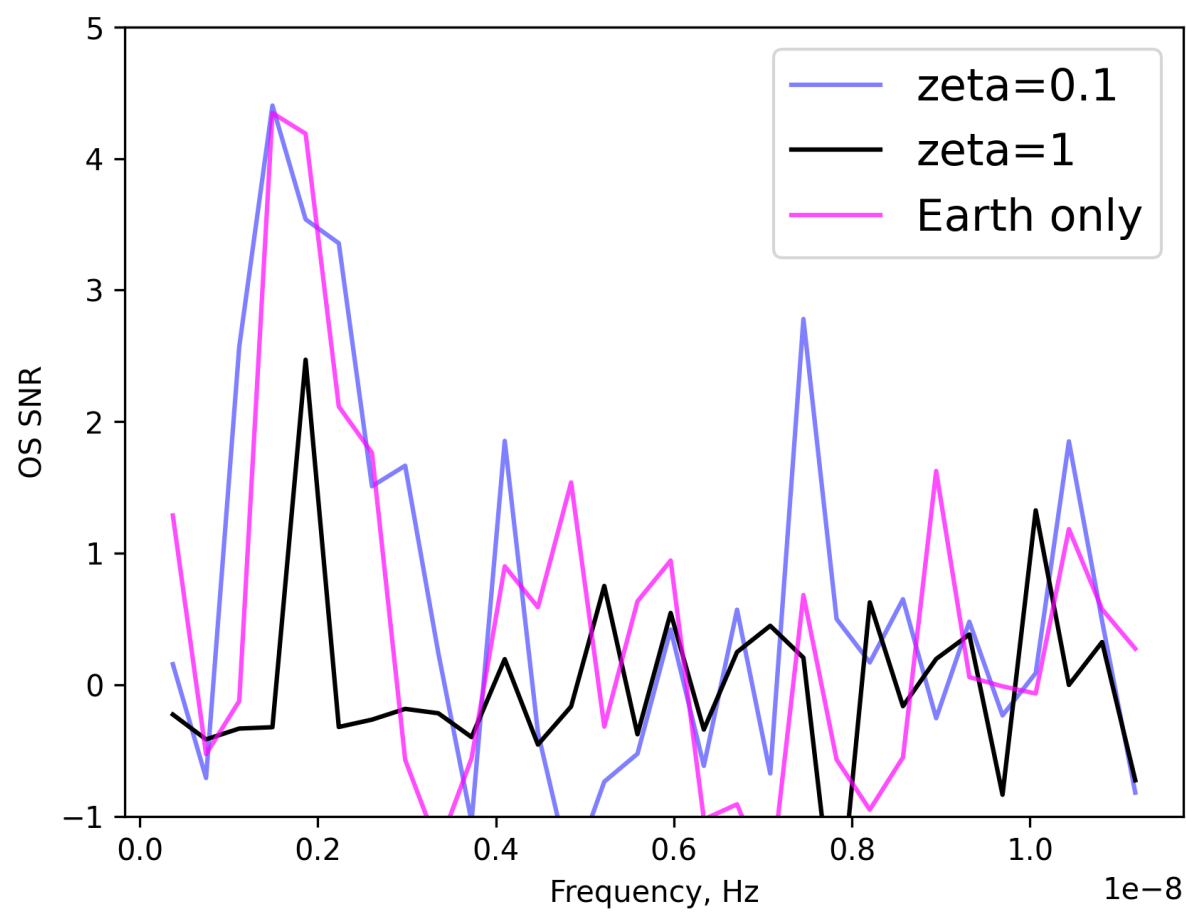
$$\Gamma(|f|) = \beta \sum_A \int_{S^2} d\hat{\Omega} \left(e^{i2\pi f L_1(1+\hat{\Omega} \cdot \hat{p}_1)} - 1 \right) \times \left(e^{-i2\pi f L_2(1+\hat{\Omega} \cdot \hat{p}_2)} - 1 \right) F_1^A(\hat{\Omega}) F_2^A(\hat{\Omega})$$

Результаты

fL-гипотеза



ζ-гипотеза



В результате, с помощью методики оптимальной статистики, подробно описанной в статьях 7-9, получено, что значимость ХД-кривой действительно зависит от ζ-параметра, что говорит нам о необходимости использовать далёкие пульсары для поиска сигнала от двойных систем СМЧД. Так, значимость ХД-кривой для далёких пульсаров (ζ=0.1) получается практически такой же, как и у ХД-кривой построенной только по земному члену, что свидетельствует о высокой скоррелированности сигнала. Для fL-гипотезы существенного изменения значимости в зависимости от порядка расстояния до пульсара обнаружить не удалось, в результате чего можно заключить о нечувствительности ХД-кривой к параметру fL. Однако планируется расширить проверку на большие статистические выборки.

Литература

- M. V. Sazhin. Opportunities for detecting ultralong gravitational waves. Soviet Astronomy Letters, 22:36–38, February 1978.
- Detweiler, S Astrophys. J. 234 1100, 1979
- R. W. Hellings and G. S. Downs. Upper limits on the isotropic gravitational radiation background from pulsar timing analysis. Astrophysical Journal, 265:L39–L42, 1983.
- Melissa Anholm, Stefan Ballmer, Jolien D. E. Creighton, Larry R. Price, and Xavier Siemens. Optimal strategies for gravitational wave stochastic background searches in pulsar timing data. Physical Review D, 79(8), April 2009.
- К. А. Постнов, Н. К. Порайко, and М. С. Пширков. Прецизионные методы хронометрирования и поляриметрии пульсаров: результаты и перспективы. Усп. физ. наук, 195(2):154–171, 2025
- Stephen R. Taylor. The nanohertz gravitational wave astronomer, 2021.
- Shashwat C. Sardesai, Sarah J. Vigeland, Kyle A. Gersbach, and Stephen R. Taylor.
- Generalized optimal statistic for characterizing multiple correlated signals in pulsar timing arrays. Phys. Rev. D, 108:124081, Dec 2023.
- Kyle A. Gersbach, Stephen R. Taylor, Patrick M. Meyers, and Joseph D. Romano. Spatial and spectral characterization of the gravitational-wave background with the pta optimal statistic. Physical Review D, 111(2), January 2025.
- S. Babak et al. European pulsar timing array limits on continuous gravitational waves from individual supermassive black hole binaries. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 455(2):1665–1679, November 2015.