

ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВАЯ АСТРОНОМИЯ: АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ И КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

К. А. Постнов^{а,б,1}, Н. А. Митичкин^{а,2}

^а Астрономический институт им. П. К. Штернберга
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Кратко обсуждаются наиболее важные результаты и конкретные источники, обнаруженные гравитационно-волновыми интерферометрами LIGO-Virgo в ходе первых трех сезонов наблюдений O1–O3, а также астрофизические и космологические каналы их образования. Показана возможность объяснения наблюдаемой корреляции эффективного спина сливающихся двойных черных дыр с отношением масс компонент в модели раскрутки пар первичных черных дыр при аккреции окружающего вещества. Также кратко рассказано о результатах поиска стохастического гравитационно-волнового сигнала в наногерцевом частотном диапазоне методом пульсарного тайминга.

We briefly discuss the most prominent results and specific sources detected by gravitational-wave observatories LIGO–Virgo during first three O1–O3 runs, as well as possible astrophysical and cosmological channels of their formation. We show that it is possible to explain the observed correlation between the effective spin of coalescing binary black holes and mass ratio of the components by accretion from the ambient medium onto primordial binary black holes. We also briefly discuss the recent results of searches for stochastic gravitational-wave background in the nano-Hz frequency band by pulsar timing arrays.

PACS: 04.30.–w; 04.30.Tv

ВВЕДЕНИЕ

Гравитационно-волновая астрономия (ГВА) — новая быстро развивающаяся область науки, исследующая астрофизические источники гравитационных волн (ГВ) методами многоволновой наземной и космической астрономии (от радио- до гамма-диапазона длин волн). Начало ГВА было положено регистрацией первого источника — сливающихся массивных черных дыр (ЧД) в двойной системе GW150914 [1]. Слияние двух ЧД как наиболее вероятного астрофизического источника в частотном

¹E-mail: pk@sai.msu.ru

²E-mail: mitichkin.nikita99@mail.ru

диапазоне чувствительности ГВ-интерферометров LIGO $\sim 10\text{--}1000$ Гц предсказывалось из эволюции двойных звезд [2–5]. Начало многоканальной астрономии положило первое открытие ГВ от сливающейся системы из двух нейтронных звезд (НЗ) GW170817 [6], сопровождавшееся многоволновым ЭМ-сигналом [7], возникающим в результате теплового и нетеплового излучения от выброса вещества в ходе слияния (так называемой «килоновой» [8]). Основные результаты коллаборации LVK (LIGO–Virgo–Kagra) за прошедшие три сезона наблюдений О1–О3 приведены в каталоге GWTC-3 [9], включающем 90 источников астрофизического происхождения — кандидатов в сливающиеся двойные ЧД, ЧД + НЗ и НЗ + НЗ. Анализу этих данных и их интерпретации посвящены уже сотни работ (см., например, обзоры [10, 11] и ссылки там). Иных ГВ-сигналов, кроме как от сливающихся двойных компактных систем, пока надежно не обнаружено (см., однако, разд. 2 ниже).

1. ДВОЙНЫЕ ЧД, ОБНАРУЖЕННЫЕ В ГВ-НАБЛЮДЕНИЯХ

Анализ ГВ-наблюдений сливающихся двойных систем с массами m_1 и m_2 и безразмерными моментами импульса (спинами) $a_i^* = J_i c / (G m_i^2)$ (G , c — ньютоновская гравитационная постоянная и скорость света) позволяет установить (с различной точностью в зависимости от амплитуды сигнала) следующие параметры: 1) чирп-массу (chirp-mass) $\mathcal{M} = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$ в системе наблюдателя \mathcal{M}_{det} ¹, массы отдельных компонент и отношение масс $q = m_2 / m_1 \leq 1$; 2) эффективный спин до слияния $\chi_{\text{eff}} = (m_1 a_1^* \cos \theta_1 + m_2 a_2^* \cos \theta_2) / (m_1 + m_2)$ (взвешенная по массам компонент проекция индивидуальных спинов на орбитальный момент импульса), проекцию суммарного спина компонент на орбитальную плоскость χ_p , спин образовавшегося объекта после слияния a_{fin}^* ; 3) фотометрическое расстояние до источника $D_l(z)$ (красное смещение z в заданной космологической модели) [12]. Классификация типа сливающейся двойной системы по ГВ-сигналу обычно основана на оценке масс компонент — компактный объект с массой $m > 3M_\odot$ заведомо считается ЧД [13, 14]². Идентификация типа источника только по ГВ-сигналу может быть сделана методами машинного обучения [16].

Анализ наблюдаемых параметров сливающихся двойных ЧД, зарегистрированных на ГВ-интерферометрах коллаборацией LVK, приводит к нескольким важным астрофизическим выводам.

1. Существуют ЧД в десятки масс Солнца, которые по своим характеристикам (массам, спинам) отличны от ЧД, наблюдаемых в галактических рентгеновских тесных двойных системах. Эволюция одиночных массивных звезд предсказывает «провал» (mass gap) в массах ЧД $\sim 60M_\odot\text{--}120M_\odot$ из-за пульсационной неустойчивости на стадии до образования железного ядра при рождении электрон-позитронных пар (pulsational pair instability), приводящей к взрыву звезды без остатка (pair-instability

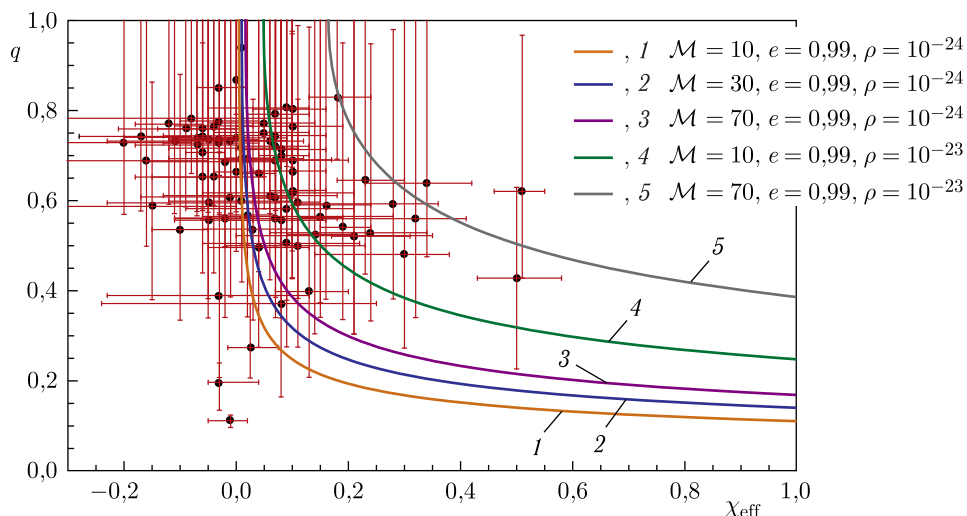
¹Чирп-масса в системе наблюдателя определяется по измерению частоты сигнала на фазе сближения объектов по квазикеплеровским орбитам до слияния и вырождена по красному смещению источника z , $\mathcal{M}_{\text{det}} = (1+z)\mathcal{M}$.

²Максимальная известная масса нейтронных звезд (НЗ) в миллисекундном пульсаре PSR J0952-0607 $M_{\text{PSR}} \approx 2,35M_\odot$ [15].

supernovae) [17, 18]. Источник GW190521 имеет максимальные массы ЧД до слияния $M_1 \approx 85M_\odot$, $M_2 \approx 66M_\odot$ [19]. Получить такие массы в сценарии эволюции изолированных массивных двойных систем возможно только с использованием специальных предположений [20]. Вероятным каналом образования двойных ЧД с большими массами может быть динамическая эволюция в плотных звездных скоплениях с иерархическим ростом массы и спина ЧД в последовательных слияниях [21]. Также обсуждается сценарий образования таких ЧД + ЧД из звезд III населения с первичным химсоставом [22] и в окрестностях активных ядер галактик [23].

2. Имеются большие (почти предельные) спины аккрецирующих ЧД в рентгеновских двойных системах [24]. Такая раскрутка ЧД естественна при аккреции вещества со второго компонента. В двойных ЧД, образующихся по стандартному астрофизическому каналу из эволюции массивных двойных систем, большие эффективные спины возможны при определенных дополнительных предположениях [25]. В источнике GW200129 форма ГВ-сигнала на стадии слияния показывает орбитальную релятивистскую прецессию, свидетельствующую о рекордно высоком спине первичной (более массивной компоненты с массой $m_1 \approx 39M_\odot$) $a_1/m_1 = 0,9_{-0,5}^{+0,1}$, наклоненном к орбитальному моменту импульса [26]. Образование таких источников в наиболее популярных астрофизических сценариях из изолированных массивных двойных систем [27] или при динамических захватах в плотных звездных скоплениях [28] получить трудно. Механизм образования подобных двойных ЧД в окрестностях активных ядер галактик рассматривается в [29].

3. Есть возможные указания на первичные ЧД (ПЧД) звездных масс из ГВ-наблюдений [31–33]. В стандартном механизме образования ПЧД [34,35] массы ПЧД естественным образом могут быть порядка $10 M_\odot$ (порядка массы внутри космологического горизонта в эпоху КХД фазового перехода при температуре $T \sim 150$ МэВ) [36] с логнормальным спектром масс, предсказываемых в некоторых моделях [37]. Логнор-



Отношение масс $q = M_2/M_1$ и эффективный момент импульса χ_{eff} сливающихся двойных ЧД по данным каталога GWTC-3 [9]. Кривые — ожидаемые корреляции χ_{eff} , приобретаемые за счет аккреции из межзвездного вещества, с отношением масс компонент q в модели [30]

мальный спектр масс ПЧД наиболее вероятен при объяснении наблюдаемых источников LIGO–Virgo [38, 39]. Найдены указания на значимую корреляцию эффективного спина сливающихся ЧД + ЧД с отношением масс [21, 40]. В простейших моделях спин ПЧД должен быть близок к нулю, однако в двойных ПЧД может возрастать при аккреции окружающего барионного вещества [30]. На рисунке показаны эффективные спины χ_{eff} и отношения масс $q = m_2/m_1$ 84 двойных ЧД из каталога GWTC-3 [9]. Кривыми показаны ожидаемые корреляции эффективного спина сливающихся двойных ПЧД для различных значений чирп-масс \mathcal{M} , орбитальных эксцентриситетов при образовании и окружающей плотности вещества [30]. Видно, что в условиях плотного окружения (например, в газовых дисках в ядрах галактик) ПЧД могут приобретать высокие эффективные спины (две верхние кривые). Вопрос о доле ПЧД среди наблюдаемых двойных источников ЧД + ЧД, обнаруженных коллаборацией LVK, остается открытым и активно обсуждается в литературе (см., например, [39, 41]).

2. ДВОЙНЫЕ НЗ + НЗ И НЗ + ЧД В ГВ-НАБЛЮДЕНИЯХ

Слияние двойных НЗ GW170817, сопровождавшееся многоволновым ЭМ-излучением (короткий гамма-всплеск GRB170817A и килоновая AT 2017gfo в галактике NGC4993), дало самую богатую информацию об источнике и позволило получить ряд фундаментальных физических и космологических ограничений [7]. Кроме масс и спина компонент, анализ ГВ-сигнала от НЗ + НЗ налагает ограничения на параметры приливной деформации, которые, в свою очередь, зависят от уравнения состояния НЗ. Ограничения на уравнение состояния и верхнюю массу НЗ (предел Толмена–Оппенгеймера–Волкова, M_{TOV}) из наблюдений сливающихся двойных НЗ GW170817, GW190814 и (возможного кандидата) GW190425 (см., например, в работах [42, 43]).

Электромагнитный сигнал от сливающихся двойных НЗ + ЧД ожидается в случае небольшого отношения масс компонент (т.е. для достаточно легких ЧД) [44]. Из ГВ-наблюдений только оцениваются массы компонент и спин ЧД. Исходя из малой массы второго компонента $< M_{\text{TOV}}$ источники GW200105 и GW200115 классифицируются как слияния ЧД + НЗ [45]. Оценка темпа слияния и доля зарегистрированных НЗ + ЧД не противоречит ожидаемым данным из анализа эволюции массивных двойных систем [46].

3. ПОИСК СТОХАСТИЧЕСКОГО ГВ-ФОНА МЕТОДОМ ПУЛЬСАРНОГО ТАЙМИНГА

Метод пульсарного тайминга, предложенный в конце 1970-х гг. [47, 48], используется для детектирования возможного стохастического фона ГВ из анализа многолетних наблюдений несколькими коллаборациями наземных радиотелескопов в наногерцевом диапазоне частот (см. обзор [49] и ссылки там). В методе пульсарного тайминга ГВ с амплитудой h на частоте f вызывают остаточные уклонения в моментах прихода импульсов на уровне $r \simeq 10$ [нс] $(h/10^{-16})/(f/10^{-8}$ Гц), близко к пределу чувствительности измерений времен прихода импульсов от миллисекундных пульсаров радиотелескопами. Характерная амплитуда стохастического ГВ-фона h_c обычно ищется в виде степенного закона $h_c = A(f/1 \text{ год}^{-1})$. Стохастический ГВ-фон может возникнуть, в частности, при слиянии двойных сверхмассивных ЧД в ядрах

галактик [50] ($\alpha = -2/3$), генерироваться космическими струнами [51] ($\alpha = -7/6$), возникать при фазовых переходах в ранней Вселенной [52] ($\alpha = -1$) из первичных космологических возмущений на инфляционной стадии [53, 54] ($\alpha = -1$). ГВ-фон может также сопровождать образование первичных ЧД при коллапсе из первичных скалярных возмущений [55]. Последние результаты коллабораций NANOGrav [56], IPTA [57] показывают наличие в данных общего сигнала от стохастического процесса с амплитудой $A \approx 4 \cdot 10^{-15}$ и наклоном $\alpha \sim -0,5$, который может быть интерпретирован, в частности, в модели ГВ-фона от сверхмассивных ЧД с пространственной плотностью $\sim 10^{-5}$ Мпк $^{-3}$ [57]. Однако для доказательства ГВ-природы этого сигнала требуется выявить специфическую пространственную квадрупольную корреляцию Хеллингса–Даунса [58], которая пока надежно не установлена. Подтверждение открытия стохастического ГВ-фона в данных пульсарного тайминга будет важнейшим экспериментальным результатом ГВ-астрономии.

Благодарности. Авторы благодарят РФФ (грант 22-12-00103) за поддержку.

Работа Н. М. поддержана грантом Фонда развития теоретической физики «Базис» (№ 22-2-10-2-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abbott B.P. et al. (LIGO Scientific Collab. and Virgo Collab. Collab.)*. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 061102; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
2. *Tutukov A. V., Yungelson L. R.* The Merger Rate of Neutron Star and Black Hole Binaries // *MNRAS*. 1993. V. 260. P. 675–678.
3. *Lipunov V. M., Postnov K. A., Prokhorov M. E.* Formation and Coalescence of Relativistic Binary Stars: The Effect of Kick Velocity // *MNRAS*. 1997. V. 288, No. 1. P. 245–259; [arXiv:astro-ph/9702060](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9702060).
4. *Lipunov V. M., Postnov K. A., Prokhorov M. E.* First LIGO Events: Binary Black Holes Mergings // *New Astron.* 1997. V. 2, No. 1. P. 43–52; [arXiv:astro-ph/9610016](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9610016).
5. *Lipunov V. M., Postnov K. A., Prokhorov M. E.* Black Holes and Gravitational Waves: Possibilities for Simultaneous Detection Using First-Generation Laser Interferometers // *Astron. Lett.* 1997. V. 23, No. 4. P. 492–497.
6. *Abbott B.P. et al. (LIGO Scientific Collab. and Virgo Collab. Collab.)*. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 119. P. 161101; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.119.161101>.
7. *Abbott B.P. et al.* Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger // *Astrophys. J. Lett.* 2017. V. 848, No. 2. P. L12; [arXiv:1710.05833](https://arxiv.org/abs/1710.05833).
8. *Metzger B. D., Martínez-Pinedo G., Darbha S., Quataert E., Arcones A., Kasen D., Thomas R., Nugent P., Panov I. V., Zinner N. T.* Electromagnetic Counterparts of Compact Object Mergers Powered by the Radioactive Decay of r-Process Nuclei // *MNRAS*. 2010. V. 406, No. 4. P. 2650–2662; [arXiv:1001.5029](https://arxiv.org/abs/1001.5029) [astro-ph.HE].
9. *Abbott R. et al. (LVK Collab.)*. GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo during the Second Part of the Third Observing Run. [arXiv:2111.03606](https://arxiv.org/abs/2111.03606). 2021.
10. *Spera M., Trani A. A., Mencagli M.* Compact Binary Coalescences: Astrophysical Processes and Lessons Learned // *Galaxies*. 2022. V. 10, No. 4. P. 76; [arXiv:2206.15392](https://arxiv.org/abs/2206.15392).
11. *Mandel I., Broekgaarden F. S.* Rates of Compact Object Coalescences // *Living Rev. Relativ.* 2022. V. 25, No. 1. P. 1; [arXiv:2107.14239](https://arxiv.org/abs/2107.14239).
12. *Schutz B. F.* Determining the Hubble Constant from Gravitational Wave Observations // *Nature*. 1986. V. 323, No. 6086. P. 310–311.

13. *Rhoades C. E., Ruffini R.* Maximum Mass of a Neutron Star // *Phys. Rev. Lett.* 1974. V. 32, No. 6. P. 324–327.
14. *Lattimer J. M., Prakash M.* The Equation of State of Hot, Dense Matter and Neutron Stars // *Phys. Rep.* 2016. V. 621. P. 127–164; arXiv:1512.07820.
15. *Romani R. W., Kandel D., Filippenko A. V., Brink T. G., Zheng W.* PSR J0952-0607: The Fastest and Heaviest Known Galactic Neutron Star // *Astrophys. J. Lett.* 2022. V. 934, No. 2. P. L17; arXiv:2207.05124.
16. *Qiu R., Krastev P., Gill K., Berger E.* Deep Learning Detection and Classification of Gravitational Waves from Neutron Star-Black Hole Mergers. 10. arXiv:2210.15888. 2022.
17. *Woosley S. E.* Pulsational Pair-Instability Supernovae // *Astrophys. J.* 2017. V. 836, No. 2. P. 244; arXiv:1608.08939.
18. *Woosley S. E., Heger A.* The Pair-Instability Mass Gap for Black Holes // *Astrophys. J. Lett.* 2021. V. 912, No. 2. P. L31; arXiv:2103.07933.
19. *Abbott R. et al. (LIGO Scientific Collab. and Virgo Collab. Collab.).* GW190521: A Binary Black Hole Merger with a Total Mass of $150 M_{\odot}$ // *Phys. Rev. Lett.* 2020. V. 125. P. 101102; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.125.101102>.
20. *Farmer R., Renzo M., de Mink S. E., Fishbach M., Justham S.* Constraints from Gravitational-Wave Detections of Binary Black Hole Mergers on the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ Rate // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 902, No. 2. P. L36; arXiv:2006.06678.
21. *Kimball C., Talbot C., Berry C. P. L., Zevin M., Thrane E., Kalogera V., Buscicchio R., Carney M., Dent T., Middleton H., Payne E., Veitch J., Williams D.* Evidence for Hierarchical Black Hole Mergers in the Second LIGO–Virgo Gravitational Wave Catalog // *Astrophys. J. Lett.* 2021. V. 915, No. 2. P. L35; arXiv:2011.05332.
22. *Tanikawa A., Susa H., Yoshida T., Trani A. A., Kinugawa T.* Merger Rate Density of Population III Binary Black Holes below, above, and in the Pair-instability Mass Gap // *Astrophys. J.* 2021. V. 910, No. 1. P. 30; arXiv:2008.01890.
23. *Tagawa H., Kocsis B., Haiman Z., Bartos I., Omukai K., Samsing J.* Mass-Gap Mergers in Active Galactic Nuclei // *Astrophys. J.* 2021. V. 908, No. 2. P. 194; arXiv:2012.00011.
24. *Draghis P. A., Miller J. M., Zoghbi A., Reynolds M., Costantini E., Gallo L. C., Tomsick J. A.* A Systematic View of Ten New Black Hole Spins. arXiv:2210.02479. 2022.
25. *Postnov K. A., Kuranov A. G.* Black Hole Spins in Coalescing Binary Black Holes // *MNRAS.* 2019. V. 483, No. 3. P. 3288–3306; arXiv:1706.00369.
26. *Hannam M., Hoy C., Thompson J. E., Fairhurst S., Raymond V. et al.* General-Relativistic Precession in a Black-Hole Binary. arXiv:2112.11300.
27. *Belczynski K., Holz D. E., Bulik T., O’Shaughnessy R.* The First Gravitational-Wave Source from the Isolated Evolution of Two Stars in the 40–100 Solar Mass Range // *Nature.* 2016. V. 534. P. 512–515; arXiv:1602.04531.
28. *Rodriguez C. L., Haster C. J., Chatterjee S., Kalogera V., Rasio F. A.* Dynamical Formation of the GW150914 Binary Black Hole // *Astrophys. J. Lett.* 2016. V. 824. P. L8; arXiv:1604.04254.
29. *Tagawa H., Haiman Z., Bartos I., Kocsis B., Omukai K.* Signatures of Hierarchical Mergers in Black Hole Spin and Mass Distribution // *MNRAS.* 2021. V. 507, No. 3. P. 3362–3380; arXiv:2104.09510.
30. *Postnov K. A., Mitichkin N. A.* Spins of Primordial Binary Black Holes before Coalescence // *JCAP.* 2019. V. 2019, No. 6. P. 044; arXiv:1904.00570.
31. *Bird S., Cholis I., Muñoz J. B., Ali-Haïmoud Y., Kamionkowski M., Kovetz E. D., Raccanelli A., Riess A. G.* Did LIGO Detect Dark Matter? // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116, No. 20. P. 201301; arXiv:1603.00464.

32. *Blinnikov S., Dolgov A., Porayko N.K., Postnov K.* Solving Puzzles of GW150914 by Primordial Black Holes // JCAP. 2016. V. 11. P. 036; arXiv:1611.00541.
33. *De Luca V., Desjacques V., Franciolini G., Malhotra A., Riotto A.* The Initial Spin Probability Distribution of Primordial Black Holes // JCAP. 2019. V. 2019, No. 5. P. 018; arXiv:1903.01179.
34. *Zel'dovich Y.B., Novikov I.D.* The Hypothesis of Cores Retarded during Expansion and the Hot Cosmological Model // Sov. Astron. 1967. V. 10. P. 602.
35. *Carr B.J., Hawking S.W.* Black Holes in the Early Universe // MNRAS. 1974. V. 168. P. 399–416.
36. *Dolgov A., Postnov K.* Why the Mean Mass of Primordial Black Hole Distribution Is Close to $10M_{\text{solar}}$ // JCAP. 2020. V. 2020, No. 7. P. 063; arXiv:2004.11669.
37. *Dolgov A., Silk J.* Baryon Isocurvature Fluctuations at Small Scales and Baryonic Dark Matter // Phys. Rev. D. 1993. V. 47, No. 10. P. 4244–4255.
38. *Dolgov A.D., Kuranov A.G., Mitichkin N.A., Porey S., Postnov K.A., Sazhina O.S., Simkin I.V.* On Mass Distribution of Coalescing Black Holes // JCAP. 2020. V. 2020, No. 12. P. 017; arXiv:2005.00892.
39. *Liu L., You Z.Q., Wu Y., Chen Z.C.* Constrain the Merger History of Primordial-Black-Hole Binaries from GWTC-3. arXiv:2210.16094. 2022. 10.
40. *Adamcewicz C., Thrane E.* Do Unequal-Mass Binary Black Hole Systems Have Larger χ_{eff} ? Probing Correlations with Copulas in Gravitational-Wave Astronomy. arXiv:2208.03405. 2022.
41. *Escrivà A., Bagui E., Clesse S.* Simulations of PBH Formation at the QCD Epoch and Comparison with the GWTC-3 Catalog. arXiv:2209.06196. 2022.
42. *Rezzolla L., Most E.R., Weih L.R.* Using Gravitational-Wave Observations and Quasi-Universal Relations to Constrain the Maximum Mass of Neutron Stars // Astrophys. J. Lett. 2018. V. 852, No. 2. P. L25; arXiv:1711.00314.
43. *Biswas B.* Bayesian Model Selection of Neutron Star Equations of State Using Multi-Messenger Observations // Astrophys. J. 2022. V. 926, No. 1. P. 75; arXiv:2106.02644.
44. *Postnov K.A., Kuranov A.G., Simkin I.V.* Possible Electromagnetic Phenomena during the Coalescence of Neutron Star-Black Hole Binary Systems // Astron. Lett. 2020. V. 45, No. 11. P. 728–739; arXiv:2005.14309.
45. *Abbott R. et al. (LVK Collab.).* Observation of Gravitational Waves from Two Neutron Star-Black Hole Coalescences // Astrophys. J. Lett. 2021. V. 915, No. 1. P. L5; arXiv:2106.15163.
46. *Postnov K.A., Kuranov A.G., Mitichkin N.A.* Spins of Black Holes in Coalescing Compact Binaries // Phys. Usp. 2019. V. 62, No. 11. P. 1153–1161; arXiv:1907.04218.
47. *Sazhin M.V.* Opportunities for Detecting Ultralong Gravitational Waves // Sov. Astron. 1978. V. 22. P. 36–38.
48. *Detweiler S.* Pulsar Timing Measurements and the Search for Gravitational Waves // Astrophys. J. 1979. V. 234. P. 1100–1104.
49. *Verbiest J.P.W., Osłowski S., Burke-Spolaor S.* Pulsar Timing Array Experiments // Handbook of Gravitational Wave Astronomy. 2021. P. 4.
50. *Sesana A., Vecchio A., Colacino C.N.* The Stochastic Gravitational-Wave Background from Massive Black Hole Binary Systems: Implications for Observations with Pulsar Timing Arrays // MNRAS. 2008. V. 390, No. 1. P. 192–209; arXiv:0804.4476 [astro-ph].
51. *Ölmez S., Mandić V., Siemens X.* Gravitational-Wave Stochastic Background from Kinks and Cusps on Cosmic Strings // Phys. Rev. D. 2010. V. 81, No. 10. P. 104028; arXiv:1004.0890 [astro-ph.CO].
52. *Grishchuk L.P.* Reviews of Topical Problems: Relic Gravitational Waves and Cosmology // Phys. Usp. 2005. V. 48, No. 12. P. 1235–1247; arXiv:gr-qc/0504018.

53. *Grishchuk L. P.* Amplification of Gravitational Waves in an Isotropic Universe // *Sov. J. Exp. Theor. Phys.* 1975. V. 40. P. 409.
54. *Rubakov V. A., Sazhin M. V., Veryaskin A. V.* Graviton Creation in the Inflationary Universe and the Grand Unification Scale // *Phys. Lett. B.* 1982. V. 115, No. 3. P. 189–192.
55. *De Luca V., Franciolini G., Riotto A.* NANOGrav Data Hints at Primordial Black Holes as Dark Matter // *Phys. Rev. Lett.* 2021. V. 126, No. 4. P. 041303; arXiv:2009.08268.
56. *Arzoumanian Z. et al. (NANOGrav Collab.).* The NANOGrav 12.5 yr Data Set: Search for an Isotropic Stochastic Gravitational-Wave Background // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 905, No. 2. P. L34; arXiv:2009.04496.
57. *Antoniadis J. et al. (International Pulsar Timing Array Collab.).* The International Pulsar Timing Array Second Data Release: Search for an Isotropic Gravitational Wave Background // *MNRAS.* 2022. V. 510, No. 4. P. 4873–4887; arXiv:2201.03980.
58. *Hellings R. W., Downs G. S.* Upper Limits on the Isotropic Gravitational Radiation Background from Pulsar Timing Analysis // *Astrophys. J. Lett.* 1983. V. 265. P. L39–L42.

Получено 27 октября 2022 г.