

УДК 524.882

© Чех И. И., Митичкин Н. А., Постнов К. А., 2024

## ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ МАССЫ: АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ\*

Чех И. И.<sup>b,a,1</sup>, Митичкин Н. А.<sup>b,a,2</sup>, Постнов К. А.<sup>c,b,a,3</sup><sup>a</sup> ГАИШ МГУ, г. Москва, 119234, Россия.<sup>b</sup> Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия.<sup>c</sup> Казанский Федеральный Университет, г. Казань, 420008, Россия.

В настоящее время в Галактике известна почти сотня кандидатов в черные дыры (ЧД), основными признаками которых является динамически оцененная масса невидимого компонента тесной двойной системы без признаков твердой поверхности. Известны также сверхмассивные ЧД в ядрах галактик (СМЧД). Наиболее изученными СМЧД являются Sgr A\* в центре Млечного Пути и M87\*. С 2015 г также наблюдаются гравитационно-волновые (ГВ) сигналы от сливающихся двойных ЧД с массами до 100 масс Солнца. ЧД промежуточной массы (ЧДПМ) остаются гипотетическими объектами, которые могут находиться в центрах шаровых скоплений и ядрах карликовых галактик. Мы рассматриваем возможную модель образования первичных ЧДПМ (ПЧДПМ) из возмущений кривизны на стадии инфляции с дополнительным скалярным комплексным полем с барионным зарядом. Обсуждается возможность регистрации ГВ сигнала от двойных ПЧДПМ в мГц диапазоне планируемыми космическими ГВ-интерферометрами (LISA, TaiJi, TianQin), а также их возможную связь с популяцией двойных ПЧД, регистрируемых наземными ГВ-детекторами.

*Ключевые слова:* Первичные черные дыры, гравитационные волны, космические лазерные интерферометры.

## INTERMEDIATE MASS BLACK HOLES: ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY

Chekh I. I.<sup>b,a,1</sup>, Mitichkin N. A.<sup>b,a,2</sup>, Postnov K. A.<sup>c,b,a,3</sup><sup>a</sup> SAI, MSU n.a. M.V. Lomonosov, Moscow, 119234, Russia.<sup>b</sup> Faculty of Physics, MSU n.a. M.V. Lomonosov, Moscow, 119991, Russia.<sup>c</sup> Kazan Federal University, Kazan, 420008, Russia.

In the Galaxy, about a hundred black hole (BH) candidates in close binaries are known. The main feature of a BH in a close binary is a high dynamical mass of the invisible component and the lack of the presence of a solid surface. Supermassive black holes in galactic nuclei (SMBHs) are also known, with the most studied being Sgr A\* in the center of the Milky Way and M87\*. Since 2015, gravitational wave (GW) signals from merging binary BHs with masses up to 100 solar masses have also been observed. Intermediate mass black holes (IMBHs) are hypothetical objects that may be located in the centers of globular clusters and dwarf galaxies. We consider a possible model for the primordial IMBH formation from curvature perturbations created during the inflationary stage with additional complex scalar field with a baryon charge. We consider the possibility of recording the GW signal from double IMBHs in mHz range by future space GW interferometers (LISA, TaiJi, TianQin), as well as their possible connection with the population of double MBHs recorded by ground-based GW-detectors.

*Keywords:* Primordial black holes, gravitational waves, space laser interferometers.

PACS: 04.20, 04.70

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2024.1.116-120

---

\*Работа поддержана РФФ (грант № 23-42-00055).

<sup>1</sup>E-mail: chekh.i.i23@physics.msu.ru<sup>2</sup>E-mail: mitichkin.nikita99@mail.ru<sup>3</sup>E-mail: kpostnov@gmail.com

## Введение

Современные исследования определяют диапазон масс для ЧДПМ от 100 до  $10^5 M_\odot$  [1]. Интерес к изучению ЧДПМ возрастает в связи с острой проблемой роста массы наблюдаемых СМЧД до миллиардов масс Солнца на больших красных смещениях, требующих или физически маловероятного роста «затравочной» ЧД с массой около 100 масс Солнца с красных смещений 20-25, или существования «затравочной» ЧДПМ с массой  $10^4 - 10^5 M_\odot$ . Вопрос о происхождении таких ЧД открыт – они могли бы образоваться в плотных звездных скоплениях [1] или иметь первичную природу (ПЧДПМ). Первое надежное подтверждение существования ЧДПМ с массой более  $100 M_\odot$  было получено в 2020 году консорциумом LVK (LIGO-Virgo-KAGRA) [2]. Данные наблюдения показывают, что ЧДПМ могут сформироваться и расти при слиянии ЧД меньшей массы. ЧДПМ также косвенно обнаруживаются в рентгеновских наблюдениях приливных разрушений звезд [3,4]. На сегодняшний день таких кандидатов мало, однако запуски космических ГВ обсерваторий (LISA, TianQin и др.) могут существенно увеличить темпы обнаружения подобных ЧДПМ. Модели показывают [5], что слияния подобных объектов являются идеальным источником для космических ГВ-интерферометров. ЧДПМ могут формироваться в центрах карликовых галактик или в больших звездных скоплениях [1]. Возможны также первичные ЧД (ПЧД), образованные в результате гравитационного коллапса первичных областей с большим возмущением плотности в ранней Вселенной [6-10].

Мы рассматриваем модель образования ПЧД из возмущений кривизны на стадии инфляции с дополнительным скалярным комплексным полем с барионным зарядом (модифицированный бариогенезис Аффлека-Дайна (Affleck–Dine)) [11]. В этой модели естественно могут образовываться ПЧДПМ с массами до  $\sim 10^4 M_\odot$  [12].

### 1. Формирование ПЧДПМ в ранней Вселенной

Модель модифицированного бариогенезиса Аффлека-Дайна [11], кроме объяснения барионной асимметрии Вселенной, предсказывает возникновение на стадии инфляции первичных возмущений кривизны с произвольным барионным зарядом (НВВ). При КХД-переходе ( $T_{QCD} \approx 100 \text{ MeV}$ ,  $t \approx 20^{-5} \text{ с}$ ) НВВ-области превращаются в большие возмущения плотности, приводящие к образованию ПЧД, компактных звездных объектов или плотных первичных газовых облаков с логнормальным спектром масс [9,12,13]:

$$dn/dM = \mu^2 \exp(-\gamma \ln^2(M/M_0)) \quad (1)$$

где  $\mu$  – нормировочная константа,  $\gamma$  и  $M_0$  – свободные параметры. Важной особенностью этого распределения является то, что степенной пре-фактор  $M^q$  вместо  $\mu^2$  не меняет логнормальный вид распределения после переопределения параметров. Распределение чирп-масс двойных систем ПЧД<sup>1</sup> с лог-нормальным спектром масс также имеет лог-нормальный вид с новой шириной  $\gamma' = 2\gamma$  и новым значением параметра  $M'_0$ , зависимым от  $M_0$ . Благодаря лог-нормальному закону распределения масс, в довольно длинном хвосте распределения могут образоваться тяжелые ПЧД. Максимальная масса ЧД зависит от продолжительности инфляции  $t_1$  после «открытия» плоских направлений  $\chi$ -потенциала [12]:

$$e^{3H(t_e - t_1)} \approx 10^{47} \left( \frac{T_h}{10^{14} \text{ GeV}} \right)^3 \frac{M_{BH}^{(max)}}{10^4 M_\odot} \frac{100 \text{ MeV}}{T_{QCD}} \quad (2)$$

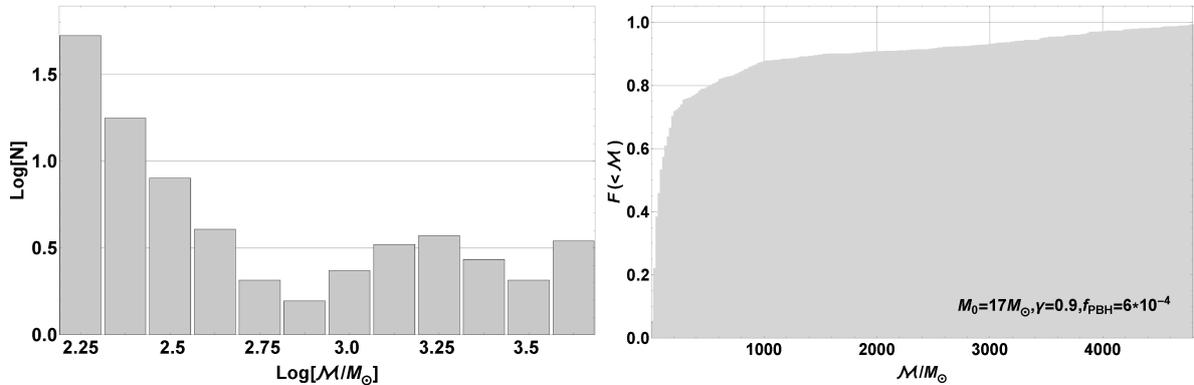
здесь  $T_h$  – температура первичного разогрева. Для формирования ПЧД с массами порядка  $10^4 M_\odot$  время формирования таких возмущений до конца инфляции  $H(t_e - t_1)$  должно быть порядка 36, что разумно для инфляционных моделей. Отметим, что области с высокой плотностью (барионные

<sup>1</sup> Чирп-масса двойной системы с массами компонентов  $M_1$  и  $M_2$  определяет форму ГВ-сигнала на стадии приближения по спирали до слияния  $M_\mu = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$

пузыри) формируются преимущественно сферически-симметричными, поскольку такие конфигурации минимизируют энергию пузыря. Их угловой момент при этом должен быть равен нулю, поскольку они образуются в результате фазового перехода в космологической материи с исчезающим угловым моментом из-за отсутствия векторных возмущений. Это разительно контрастирует с астрофизическими ЧД, у которых угловой момент может быть существенным [8].

## 2. Слияние двойных ПЧДПМ для космических ГВ-интерферометров

Вероятность  $f(t)$ , что две ПЧД с массами  $M_1$  и  $M_2$  сольются во временном интервале от  $t$  до  $t + dt$  была получена в работах [14, 15]. Темп слияний ПЧД с массами  $M_1, M_2$  в двойных системах в кубическом гигапарсеке за один год будет [16]  $\mathcal{R} = \frac{d\mathcal{R}}{dM_1 \cdot dM_2} = n_{PBH} f(t)$ . Здесь  $n_{PBH}$  – средняя концентрация ПЧД. Зная красное смещение  $z(t)$ , для каждого источника можно рассчитать отношение сигнал/шум на ГВ-детекторе с заданной чувствительностью и рассчитать темп регистрации двойных ЧД с данной чирп-массой. Мы рассмотрели конкретный космический детектор TianQin [17]. Методом Монте-Карло было построено модельное распределение чирп-масс сливающихся двойных ПЧД, которые находятся в пределах чувствительности TianQin с отношением сигнал/шум  $> 8$  (Рис. 1а). Кумулятивное распределение показано на Рис. 1б. Видно, что порядка 0.15 двойных ПЧД с чирп-массами  $M_c > 1000 M_\odot$  могут регистрироваться детекторами TianQin в год с отношением сигнал/шум  $> 8$  для параметров логнормального распределения  $M_0 = 17 M_\odot, \gamma = 0.9$ , которые описывают в целом распределение чирп-масс сливающихся двойных ЧД в данных LVK [10]. Следует отметить, что эти параметры отличаются от наиболее вероятных значений, которые описывают наблюдаемое «двугорбое» распределение чирп-масс в данных GWC-3 двумя примерно равными по численности популяциями двойных ЧД – астрофизическими и первичными ( $M_0 \approx 30 M_\odot, \gamma \approx 10$ ) [8]. Необходим дальнейший набор статистики для уточнения формы наблюдаемого распределения.



**Рис. 1.** Слева: предварительное модельное распределение чирп-масс сливающихся двойных ПЧД, которые находятся в пределах чувствительности детектора TianQin с отношением сигнал/шум  $> 8$ . Начальные параметры лог-нормального распределения масс ПЧД  $M_0 = 17 M_\odot, \gamma = 0.9$ . Доля ПЧД в полной плотности темной материи  $f_{pbh} = 6 \times 10^{-4}$  в соответствии с наблюдаемым LVK темпом слияния двойных ЧД [8]. Справа: кумулятивное распределение сливающихся двойных ПЧД для детектора TianQin.

## Заключение

Астрофизические ЧДПМ с массами  $\approx 10^3 - 10^5 M_\odot$  обнаружены (с высокой долей вероятности) в центрах карликовых галактик. Кроме того, появляются доказательства существования двойных ЧДПМ в галактических центрах (наблюдения JWST). Однако до сих пор не известен точный механизм их образования.

Мы рассмотрели возможность наблюдательных проявлений ЧДПМ в модели модифицированного бариогенезиса Аффлека-Дайна [11] с массой до  $10^4 M_\odot$ . Такие ЧДПМ могут быть зародышами для раннего образования СМЧД в центрах галактик [12]. Нами сделана оценка числа двойных ПЧДПМ, которые могут регистрироваться космическими гравитационно-волновыми лазерными интерферометрами (Рис. 1). Предполагая, что  $\approx 0,01\%$  темной материи сосредоточено в первичных ЧД с логнормальным спектром масс, до 15% от количества слияний двойных ЧДПМ с массами  $>1000 M_\odot$  можно будет обнаружить за один год наблюдений с помощью будущих космических лазерных ГВ-интерферометров, таких как LISA или TianQin.

Работа поддержана грантом РФФ 23-42-00055. Также, работа Митичкина Н.А. поддержана грантом фонда «Базис» 22-2-10-2-1.

## Список литературы/References

1. Abbas Askar, Vivienne F. Baldassare, Mar Mezcua. Intermediate-Mass Black Holes in Star Clusters and Dwarf Galaxies. arXiv:2311.12118, 2023.
2. Abbott R., Abbott T.D., Abraham S., Acernese F., Ackley K., Adams C., Adhikari R.X., Adya V.B., Affeldt C., Agathos M., Agatsuma K., Aggarwal N., Aguiar O.D., Aich A., Aiello L., Ain A., LIGO Scientific Collaboration, and Virgo Collaboration. Properties and Astrophysical Implications of the  $150 M_\odot$  Binary Black Hole Merger GW190521. *Astrophys. J. Lett.*, 2020, vol. 900, no. 13.
3. Lin D., Strader J., Carrasco E.R., Page D., Romanowsky A.J., Homan J., Irwin J.A., Remillard R.A., Godet O., Webb N.A. A luminous X-ray outburst from an intermediate-mass black hole in an off-centre star cluster. *Nat. Astron.*, 2018, vol. 2, no. 8, pp. 656–661.
4. Wen S., Jonker P.G., Stone N.C., Zabludoff A.I. Mass, Spin, and Ultralight Boson Constraints from the Intermediate-mass Black Hole in the Tidal Disruption Event 3XMMJ215022.4-055108. *Astrophys. J.*, 2021, vol. 918, no. 46.
5. Bellovary J.M., Cleary C.E., Munshi F., Tremmel M., Christensen C.R., Brooks A., Quinn T.R. Multi messenger signatures of massive black holes in dwarf galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, vol. 482, iss. 3, pp. 2913–2923.
6. Zel'dovich Y.B., Novikov I.D. The Hypothesis of Cores Retarded during Expansion and the Hot Cosmological Model. *Sov. Astron.*, 1967, vol. 10, no. 4, pp. 602–603.
7. Hawking S. Gravitationally collapsed objects of very low mass. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1971, vol. 152, iss. 1, p. 75–78.
8. Postnov K.A., Kuranov A.G., Mitichkin N.A. Astrophysical appearance of primordial black holes. arXiv:2309.16246v1, 2023.
9. Dolgov A.D., Kawasaki M., Kevlishvili N. Inhomogeneous baryogenesis, cosmic antimatter, and dark matter. *Nuclear Physics B*, 2009, vol. 807, iss. 1-2, pp. 229–250.
10. 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. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2020, iss. 12, art. id 017.
11. Dolgov A.D., Silk J. Baryon isocurvature fluctuations at small scales and baryonic dark matter. *Phys. Rev. D*, 1993, vol. 47, pp. 4244–4255.
12. Blinnikov S.I., Dolgov A.D., Porayko N.K., Postnov K.A. Solving puzzles of GW150914 by primordial black holes. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2016, iss. 11, art. id 036.
13. Dolgov A.D., Blinnikov S.I. Stars and black holes from the very early universe. *Phys. Rev. D*, 2014, vol. 89, iss. 10.
14. Ioka K., Chiba T., Tanaka T., Nakamura T. Black hole binary formation in the expanding universe: Three body problem approximation. *Phys. Rev. D*, 1998, vol. 58, no. 6, p. 063003.
15. Nakamura T., Sasaki M., Tanaka T., Thorne K. Gravitational Waves from Coalescing Black Hole MACHO Binaries. *Astrophys. J. Lett.*, 1997, vol. 487, no. 2, pp. 139–142.
16. Sasaki M., Suyama T., Tanaka T., Yokoyama S. Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, vol. 121, p. 059901.

17. Wen-Fan Feng, Hai-Tian Wang, Xin-Chun Hu, Yi-Ming Hu, Yan Wang. Preliminary study on parameter estimation accuracy of supermassive black hole binary inspirals for TianQin. *Phys. Rev. D*, 2019, vol. 99, iss. 12, p. 123002.

### Авторы

**Чех Илья Игоревич**, магистр, государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, пр-т Университетский, д. 13, Москва, 119234, Россия.

E-mail: chekh.i.i23@physics.msu.ru

**Митичкин Никита Артемович**, аспирант, государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, пр-т Университетский, д. 13, Москва, 119234, Россия.

E-mail: mitichkin.nikita99@mail.ru

**Постнов Константин Александрович**, д. ф.-м. н., профессор, Казанский Федеральный Университет, ул. Кремлевская, д. 18, Казань, 420008, Россия; государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, пр-т Университетский, д. 13, Москва, 119234, Россия; физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, д. 1 стр. 2, Москва, 119991, Россия.

E-mail: kpostnov@gmail.com

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чех И. И., Митичкин Н. А., Постнов К. А. Черные дыры промежуточной массы: астрофизика и космология. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2024. № 1. С. 116–120.

### Authors

**Chekh Ilya Igorevich**, master degree, Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Universitetskij, pr. 13, Moscow, 119234, Russia.

E-mail: chekh.i.i23@physics.msu.ru

**Mitichkin Nikita Artemovich**, graduate student, Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Universitetskij, pr. 13, Moscow, 119234, Russia.

E-mail: mitichkin.nikita99@mail.ru

**Postnov Konstantin Aleksandrovich**, Doctor of Physics and Mathematics Sc., professor, Kazan Federal University, Kremlyovskaya, 18, Kazan, 420008, Russia; Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Universitetskij, pr. 13, Moscow, 119234, Russia.; Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1/2, Moscow, 119991, Russia.

E-mail: kpostnov@gmail.com

### Please cite this article in English as:

Chekh I. I., Mitichkin N. A., Postnov K. A. Intermediate mass black holes: astrophysics and cosmology. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2024, no. 1, pp. 116–120.