

УДК 524.882

© Мелихов А. Н., Михеева Е. В., 2025

НАГРЕВ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ КАК МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ЧЕРНЫХ ДЫР*

Мелихов А. Н.^{a,1}, Михеева Е. В.^{a,2}

^a Астрокосмический центр ФИАН, г. Москва, 117997, Россия.

Изучается процесс нагрева межзвездной пыли в Галактике фотонами излучения Хокинга и на его основе строятся ограничения на долю первичных черных дыр (ПЧД) в темной материи. Рассматривается два распределения ПЧД, в одном из которых они однородно распределены во Вселенной, а в другом — повторяют профиль темной материи Галактики. В качестве профиля темной материи используется сферически-симметричный профиль Наварро-Френка-Уайта. При этом в обоих случаях предполагается, что межзвездная пыль равномерно распределена в Галактике. Также изучается нагрев межзвездной пыли в молекулярном облаке, расположенному в Центральной Молекулярной Зоне Галактики (ЦМЗ). Рассчитывается температура пыли в молекулярном облаке в зависимости от расстояния до ПЧД и строится спектр излучения пылинок.

Ключевые слова: первичные черные дыры, темная материя, межзвездная пыль.

DUST HEATING AS A METHOD FOR DETECTING BLACK HOLES

Melkhov A. N.^{a,1}, Mikheeva E. V.^{a,2}

^a Astro Space Center of the P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, 117997, Russia.

Heating of interstellar dust in Galaxy by Hawking photon radiation is studied. Based on this process, constraints on the fraction of primordial black holes (PBH) in dark matter (DM) is calculated. These constraints estimates for two distributions of PBHs, in which PBHs is homogeniously distributed in the Universe and have the same distribution as DM in the Galaxy. For second distribution we use the spherically symmetric Navarro-Frenk-White profile. In both cases, it is assumed that interstellar dust is uniformly distributed in the Galaxy. The heating of interstellar dust in a molecular cloud located in the Central Molecular Zone of the Galaxy (CMZ) is also studied. The dust temperature in the molecular cloud is calculated depending on the distance to the PBH and the emission spectrum of dust grains is constructed.

Keywords: primordial black holes, dark matter, interstellar dust.

PACS: 04.70.Dy, 95.35.+d, 98.38.-j

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2025.1.114-119

Введение

Несмотря на то, что существование темной материи является давно установленным фактом, на сегодняшний день нет общепризнанного кандидата среди элементарных частиц стандартной модели на ее роль, а многолетние попытки поиска таких частиц на экспериментальных установках не увенчались успехом. По этой причине на роль темной материи выдвигаются и альтернативные кандидаты, в частности такие, как первичные черные дыры (ПЧД). Выдвижение этих объектов на роль кандидата в темную материю мотивируется тем, что их космологические свойства сходны с

*Работа поддержана РНФ (грант № 24-22-00146).

¹E-mail: melikhov94@inbox.ru

²E-mail: helen@asc.rssi.ru

космологическими свойствами «холодной» темной материи. Впервые это было высказано в ранних исследованиях ПЧД [1] и в последующем многократно обсуждалось в литературе (см., например, [2, 3]). Эта идея стала особенно актуальна после детектирования LIGO гравитационных волн от сливающихся черных дыр [4].

Черные дыры могут быть источником теплового излучения, составными элементами которого могут быть различные частицы, в том числе и фотоны [5]. Этот физический процесс был назван «испарением» черной дыры. При этом температура излучения черной дыры обратно пропорциональна ее массе и определяется выражением:

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M}, \quad (1)$$

где k_B — постоянная Больцмана, а поток частиц от испарения одной ПЧД дается формулой:

$$\frac{dN_\gamma}{dt dE} = \frac{\Gamma}{2\pi\hbar} \left[\exp\left(E/k_B T\right) \pm 1 \right]^{-1}, \quad (2)$$

где знак плюс используется для безмассовых фермионов, а минус — для бозонов. Коэффициент Γ учитывает отклонение от излучения абсолютного черного тела и называется серым фактором (или коэффициентом поглощения).

На сегодняшний день нет доказательств существования ПЧД. Тем не менее, имеются ограничения на долю первичных черных дыр в космологической плотности темной материи (параметр $f \equiv \rho_{PBH}/\rho_{DM}$), полученные из анализа разных видов наблюдательных данных (см. обзор [6]).

Межзвездная пыль хорошо поглощает ультрафиолетовое излучение и нагревается за счет излучения звезд, переизлучая тепловую энергию в инфракрасном диапазоне. Однако в рентгеновском диапазоне эффективность поглощения пылинок снижается (см., например, [7–9]), а поглощение пылинками фотонов с энергиями выше 1 МэВ не изучено. Тем не менее, представляет интерес определить насколько сильно ПЧД могут нагреть межзвездную пыль и насколько сильный сигнал можно получить из-за этого эффекта. Поэтому в рамках задачи была рассчитана температура нагрева пыли в межзвездном облаке фотонами излучения Хокинга в зависимости от расстояния до ПЧД и построен спектр излучения пылинок. Также изучение этого эффекта интересно ввиду необходимости поиска новых способов наложить ограничение на количество ПЧД.

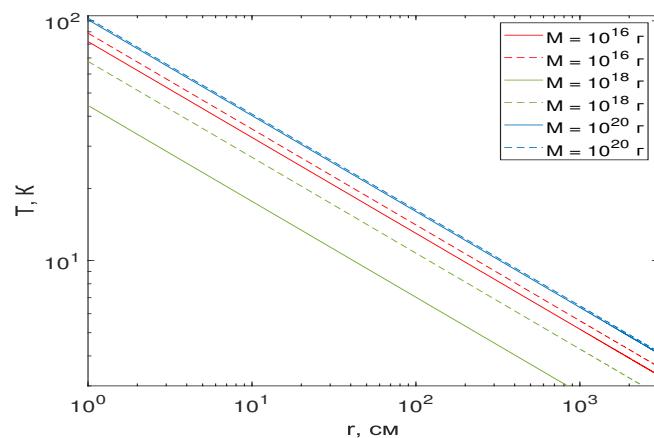


Рис. 1. Зависимость температуры графитовых (сплошные линии) и силикатных (пунктирные линии) пылинок от расстояния до ПЧД с массами $M = 10^{16}$ г, $M = 10^{18}$ г и $M = 10^{20}$ г (см. легенду). График приведен для пылинок с размером $a = 0.01$ мкм.

1. Результаты

В работах [10, 11] были проанализированы ограничения на долю ПЧД в темной материи для монохроматической функции масс и логнормального распределения для случаев, когда ПЧД рав-

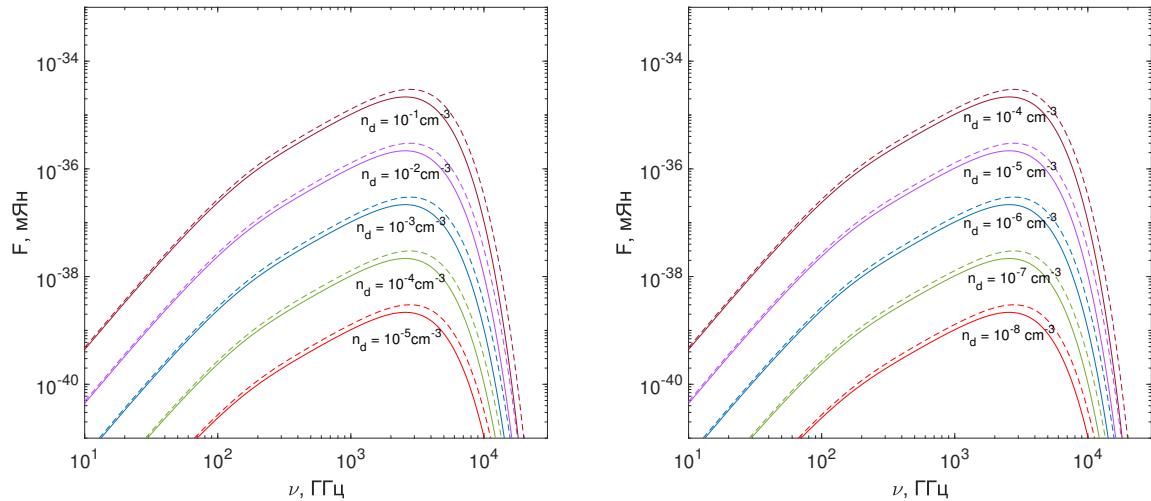


Рис. 2. Спектры излучения пылинок, нагреваемых ПЧД с массой $M = 10^{16}$ г для различных значений концентраций пыли в молекулярном облаке. Размеры пылинок $a = 0.01$ мкм (слева) и $a = 0.1$ мкм (справа). Сплошными цветными линиями обозначены спектры графитовых, пунктирными цветными линиями – силикатных пылинок.

номерно распределены во Вселенной и когда повторяют профиль темной материи в Галактике (в качестве профиля темной материи рассматривался профиль Наварро-Френка-Уайта), при этом в обоих случаях предполагалось, что пылинки равномерно распределены в Галактике. Ограничения строились для ПЧД с массами от 10^{15} до 10^{18} г. Результаты были получены при использовании следующего приближения для эффективности поглощения:

$$Q(\lambda) = \begin{cases} 1, & \lambda \leq 2\pi a \\ \frac{2\pi a}{\lambda}, & \lambda > 2\pi a. \end{cases} \quad (3)$$

Однако вид функции эффективности поглощения в рентгеновском и гамма диапазоне является предметом исследований и дискуссий, поэтому была произведена переоценка ограничений на параметр f . При этом эффективность поглощения взята из работы [9]. Это привело к «исчезновению» ограничений как в случае, когда ПЧД равномерно распределены во Вселенной, так и в случае, когда их распределение в Галактике повторяет профиль темной материи, т.е. допустимым оказывается $f = 1$. Это означает, что для данного метода поиска ограничений на ПЧД таких ограничений нет, т.е. для ПЧД в рассмотренном диапазоне масс вся темная материя может быть обусловлена ПЧД.

Задача по нагреву пыли в молекулярном облаке фотонами излучения Хокинга решена в следующих предположениях: межзвездное облако является сферически-симметричным и имеет радиус 5 пк; ПЧД с массой $10^{16} - 10^{20}$ г расположено в центре данного облака; пылевые частицы поглощают и переизлучают рентгеновские и гамма-фотоны ПЧД в непрерывном спектре, при этом процессами рассеяния пренебрегается ввиду того, что эффективность рассеяния в рассматриваемом диапазоне длин волн слабо изучено; все пылинки в облаке имеют одинаковые размеры и их температура зависит только от расстояния до ПЧД; рассматриваются только достаточно большие пылинки (с размером больше 0.01 мкм), для которых нагрев не приводит к разрушению или скачкообразному изменению температуры, что позволяет пренебречь стохастическими процессами; вычисления проводились для пылинок размером 0.01, 0.02, 0.05 и 0.1 мкм; эффективность поглощения для рентгеновских и гамма-фотонов была взята из [9], а для фотонов видимого и ультрафиолетового излучения было использовано приближение согласно (3); концентрация пыли была вычислена из концентрации газа, взятой из литературы [12–14], из условия, что масса пыли составляет 1% от

массы газа; рассматривались отдельно графитовые и силикатные пылинки. Температура пылинок в зависимости от расстояния определялась из условия лучистого равновесия.

Рис. 1 иллюстрирует зависимости температуры графитовых и силикатных пылинок от расстояния до ПЧД с массами 10^{16} г, 10^{18} г и 10^{20} г. Как видно из графика, температура пыли резко спадает с расстоянием до ПЧД. Пылинки нагреваются до температуры $T_d \geq 3$ К в сферическом слое радиусом $r \lesssim 10^3$ см. Поскольку в этой случае температура слабо зависит от размера пылинки, мы приводим только этот график и не приводим графики для пылинок с размерами 0.02, 0.05 и 0.1 мкм.

Спектры излучения графитовых и силикатных пылинок, нагреваемых ПЧД с массой $M = 10^{16}$ г, при различных концентрациях и размерах пылинок представлен на рис. 2. Существенных различий в спектрах излучения пылинок, нагреваемых ПЧД с массами $M = 10^{17}$ г, $M = 10^{18}$ г, $M = 10^{19}$ г и $M = 10^{20}$ г, нет. Как видно из графиков, потоки оказываются слишком низкими, поэтому наблюдение такого сигнала вызывает определенные сложности. Однако, если ПЧД является не статичной, как в рассмотренных в данной работе предположениях, а движется в молекулярном облаке, то она может успеть провзаимодействовать с большим количеством пылинок, но в таком случае необходимо учитывать стохастические процессы в температуре мелких пылинок, поскольку на крупные пылинки взаимодействие с одиночными фотонами оказывает незначительный эффект. Кроме того, увеличить потоки излучения пылинок возможно, если в молекулярном облаке расположена не одна ПЧД, а их скопление. В таком случае можно значительно увеличить сигнал, если ПЧД из этого скопления однородно распределены в молекулярном облаке. Однако, учитывая то, какую область способна нагревать вокруг себя одна ПЧД (см. рис. 1), чтобы добиться эффекта, при котором возможно наблюдение данного сигнала, необходимо, чтобы молекулярное облако содержало в себе не менее $\sim 10^{48}$ ПЧД, что, учитывая уже имеющиеся ограничения на ПЧД, в принципе невозможно.

Заключение

До недавнего времени нагрев межзвездной пыли фотонами излучения Хокинга не изучался. В данной работе рассматриваются первые шаги к изучению данной проблемы, а именно была проанализирована возможность наложить ограничения на долю ПЧД в темной материи для случая, когда ПЧД однородно распределены во Вселенной и когда ПЧД повторяют профиль темной материи в Галактике. При этом предполагается, что пылинки в обоих случаях однородно распределены в Галактике. Кроме того, был рассчитан процесс нагрева пыли фотонами от находящейся в молекулярном облаке ПЧД с массами $M = 10^{16} - 10^{20}$ г. В предположении, что пылинки равномерно распределены в сферически симметричном облаке и имеют размеры $a = 0.01, 0.02, 0.05$ и 0.1 мкм, была рассчитана температура пыли в зависимости от расстояния до ПЧД. Из полученных графиков следует, что непосредственно рядом с ПЧД пылинки нагреваются до температуры $T \lesssim 10^2$ К, а с увеличением расстояния температура резко падает. Таким образом, ПЧД может нагреть только сферический слой молекулярного облака, радиус r которого не более 10^3 см. Помимо этого в работе были построены спектры излучения нагреваемых ПЧД пылинок и показано, как вид спектров зависит от концентрации пыли в молекулярном облаке и от размеров пылинок.

Список литературы

1. Chapline G.F. Cosmological effects of primordial black holes. *Nature*, 1975, V. 253, 251–252 pp.
2. Clesse S., García-Bellido J. The clustering of massive Primordial Black Holes as Dark Matter: Measuring their mass distribution with advanced LIGO. *Phys. Dark Univ.*, 2017, V. 15, 142–147 pp.
3. Ivanov P., Naselsky P., Novikov I. Inflation and primordial black holes as dark matter. *Phys. Rev. D*, 1994, V. 50, 7173–7178 pp.

4. Abbott B. et. al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, V. 116, p. 061102.
5. Hawking S.W. Particle creation by black holes. *Commun. Math. Phys.*, 1975, V. 43, 199–220 pp.
6. Carr B. et al. Constraints on primordial black holes. *Rep. Prog. Phys.*, 2021, V. 84, p. 116902.
7. Corrales L.R., García J. Wilms J., Baganoff F. The dust-scattering component of X-ray extinction: effects on continuum fitting and high-resolution absorption edge structure. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 2016, V. 458, 1345–1351 pp.
8. Draine B.T., Hao L. Gamma-ray burst in a molecular cloud: destruction of dust and H₂, and emergent spectrum. *Astrophys. J.*, 2002, V. 569, 780–791 pp.
9. Dwek E., Smith R.K. Energy deposition and photoelectric emission from the interaction of 10 eV to 1 MeV photons with interstellar dust particles. *Astrophys. J.*, 1966, V. 459, 686–700 pp.
10. Мелихов А.Н., Михеева Е.В. Ограничение на количество первичных черных дыр из-за взаимодействия с пылью. *Астрон. журн.* 2001. Т. 99. № 5. С. 382–388.
11. Melikhov A.N., Mikheeva E.V. Constraints on primordial black holes from the interstellar dust temperature in the Galaxy. *Phys. Rev. D*, 2001, V. 107, p. 067535.
12. Bally J., Stark A.A., Wilson R.W., Henkel C. Galactic Center molecular clouds. II. Distribution and kinematics. *Astrophys. J.*, 1988, V. 324, 223–247 pp.
13. Jackson J.M. et. al. Neutral gas in the central 2 parsecs of the Galaxy. *Astrophys. J.*, 1993, V. 402, 173–184 pp.
14. Lis D.C., Goldsmith P.F. High-density gas in the core of the Sagittarius B2 molecular cloud. *Astrophys. J.*, 1991, V. 369, 157–168 pp.

References

1. Chapline G.F. Cosmological effects of primordial black holes. *Nature*, 1975, V. 253, 251–252 pp.
2. Clesse S., García-Bellido J. The clustering of massive Primordial Black Holes as Dark Matter: Measuring their mass distribution with advanced LIGO. *Phys. Dark Univ.*, 2017, V. 15, 142–147 pp.
3. Ivanov P., Naselsky P., Novikov I. Inflation and primordial black holes as dark matter. *Phys. Rev. D*, 1994, V. 50, 7173–7178 pp.
4. Abbott B. et. al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, V. 116, p. 061102.
5. Hawking S.W. Particle creation by black holes. *Commun. Math. Phys.*, 1975, V. 43, 199–220 pp.
6. Carr B. et al. Constraints on primordial black holes. *Rep. Prog. Phys.*, 2021, V. 84, p. 116902.
7. Corrales L.R., García J. Wilms J., Baganoff F. The dust-scattering component of X-ray extinction: effects on continuum fitting and high-resolution absorption edge structure. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 2016, V. 458, 1345–1351 pp.
8. Draine B.T., Hao L. Gamma-ray burst in a molecular cloud: destruction of dust and H₂, and emergent spectrum. *Astrophys. J.*, 2002, V. 569, 780–791 pp.
9. Dwek E., Smith R.K. Energy deposition and photoelectric emission from the interaction of 10 eV to 1 MeV photons with interstellar dust particles. *Astrophys. J.*, 1966, V. 459, 686–700 pp.
10. Melikhov A.N., Mikheeva E.V. Constraints on the number of primordial black holes due to interaction with dust. *Astron. Rep.*, 2022, V. 66, no. 5, 387–392.
11. Melikhov A.N., Mikheeva E.V. Constraints on primordial black holes from the interstellar dust temperature in the Galaxy. *Phys. Rev. D*, 2001, V. 107, p. 067535.
12. Bally J., Stark A.A., Wilson R.W., Henkel C. Galactic Center molecular clouds. II. Distribution and kinematics. *Astrophys. J.*, 1988, V. 324, 223–247 pp.
13. Jackson J.M. et. al. Neutral gas in the central 2 parsecs of the Galaxy. *Astrophys. J.*, 1993, V. 402, 173–184 pp.
14. Lis D.C., Goldsmith P.F. High-density gas in the core of the Sagittarius B2 molecular cloud. *Astrophys. J.*, 1991, V. 369, 157–168 pp.

Авторы

Мелихов Александр Николаевич, м.н.с., Астрокосмический центр ФИАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, г. Москва, 117997, Россия.

E-mail: melikhov94@inbox.ru

Михеева Елена Владимировна, к.ф.-м.н., с.н.с., Астрокосмический центр ФИАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, г. Москва, 117997, Россия.

E-mail: helen@asc.rssi.ru

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мелихов А. Н., Михеева Е. В. Нагрев межзвездной пыли как метод обнаружения черных дыр.

Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2025. № 1. С. 114–119.

Authors

Melikhov Aleksandr Nikolaevich, Astro Space Center of the P.N. Lebedev Physical Institute, Profsoyusnaya st., 84/32, Moscow, 117997, Russia.

E-mail: melikhov94@inbox.ru

Mikheeva Elena Vladimirovna, Ph.D., Astro Space Center of the P.N. Lebedev Physical Institute, Profsoyusnaya st., 84/32, Moscow, 117997, Russia.

E-mail: helen@asc.rssi.ru

Please cite this article in English as:

Melkhov A. N., Mikheeva E. V. Dust heating as a method for detecting black holes. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2025, no. 1, pp. 114–119.