УДК 524.8

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-4-66-72

ПЕРВИЧНЫЕ ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ, ДИФФУЗНОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ И ВОЗМОЖНАЯ ПРИРОДА ТЁМНОЙ МАТЕРИИ

Чаругин В. М.*Московский педагогический государственный университет**119991, г. Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 1, Российская Федерация**Московский государственный областной университет**141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Российская Федерация*

Аннотация

Теория эволюции ранней Вселенной предсказывает образование чёрных дыр различной массы. В зависимости от физических процессов могут образоваться чёрные дыры с массами вплоть до 10^{27} г. Из-за эффекта Хокинга квантового испарения чёрных дыр до нашего времени дожили чёрные дыры с массами свыше 10^{15} г.

Целью данной работы является расчёт интенсивности гамма-излучения от этих первичных чёрных дыр, объяснение спектра диффузного гамма-излучения Вселенной от них в диапазоне 10–100 МэВ и оценка их вклада в тёмную материю Вселенной.

Процедура и методы. Для расчётов интенсивности излучения ансамбля чёрных дыр используется приближение в виде δ -функции для излучения абсолютно чёрного тела.

Результаты. Показано, что если функция масс первичных чёрных дыр $N(M) = K \cdot M^{-\gamma}$, то интенсивность излучения Хокинга $I(\nu) \sim \nu^{\gamma}$. Так как гамма-фон Вселенной в диапазоне энергий квантов 10–100 МэВ имеет вид $I(\nu) \sim \nu^{-1.3}$ МэВ/см² с · МэВ · ср, то $N(M) = K \cdot M^{1.3}$. В этом диапазоне излучают первичные чёрные дыры с массами 10^{15} г и размерами с электрон.

Теоретическая и практическая значимость. Показано, что экстраполяция полученного распределения масс до значений $5 \cdot 10^{21}$ г позволяет объяснить наблюдаемую массу тёмной материи во Вселенной. При этом концентрация этих чёрных дыр с массами, сравнимыми с массами астероидов, такова, что их число в Солнечной системе может измеряться сотнями.

Ключевые слова: космология, первичные чёрные дыры, излучение Хокинга, тёмная материя

PRIMORDIAL BLACK HOLES, DIFFUSE GAMMA RADIATION OF THE UNIVERSE AND POSSIBLE NATURE OF DARK MATTER

V. Charugin*Moscow Pedagogical State University**ul. Malaya Pirogovskaya 1, 119991 Moscow, Russian Federation**Moscow Region State University**ul. Very Voloshinoy 24, 141014 Mytishchi, Moscow region, Russian Federation*

Abstract

The theory of evolution of the early universe predicts the formation of black holes of different mass. Depending on the physical processes, black holes can be formed with masses up to 10^{27} g. Because of the Hawking effect of quantum evaporation of black holes, black holes with masses over 10^{15} g have survived to our time.

The aim of this work is to calculate the intensity of gamma radiation from the primordial black holes, to explain the diffuse gamma spectrum of the Universe's radiation from them in the range of 10–100 MeV, and to estimate their contribution to dark matter of the Universe.

Methodology. The intensity of radiation from an ensemble of black holes is calculated by using an approximation in the form of the δ -function for the radiation of the absolutely black body.

Results. It is shown that if the function of the masses of primordial black holes is $N(M) = K \cdot M^{-\gamma}$, the intensity of Hawking's radiation is $I(\nu) \sim \nu^{\gamma}$. Since the background radiation of the Universe in the range of quantum energies 10–100 MeV has the form of $I(\nu) \sim \nu^{-1.3}$ MeV/cm² MeV · ster, then $N(M) = K \cdot M^{1.3}$. In this range there emit primary black holes with masses of 10^{15} g and sizes of an electron.

Research implications. It is shown that the extrapolation of the resulting distribution of masses to the values of $5 \cdot 10^{21}$ g allows one to explain the observed mass of dark matter in the Universe. At the same time, the concentration of these black holes with masses comparable to the masses of asteroids is such that there may be hundreds of them in the solar system.

Keywords: cosmology, primordial black holes, Hawking radiation, dark matter.

Введение

Согласно общей теории относительности радиус чёрной дыры – радиус Шварцшильда разделяет пространство на две области: внутри чёрной дыры и снаружи. Нашим наблюдениям доступно пространство вне сферы Шварцшильда; всё, что находится внутри, не может выйти оттуда и недоступно нам. Фактически, сфера Шварцшильда представляет классический потенциальный барьер, который не могут преодолеть частицы, находящиеся внутри чёрной дыры. Ситуация очень похожа на поведение частиц внутри атомного ядра, находящихся в потенциальной яме. Волновые свойства частиц позволяют им проникать через непроницаемый потенциальный барьер благодаря туннельному эффекту, чем и объясняется радиоактивный распад некоторых атомных ядер. При этом наиболее вероятен вылет из ядра частиц с энергией, соответствующей длине волны де Бройля, равной ширине потенциального барьера. В этом смысле механизм Хокинга – квантовое испарение чёрной дыры – можно рассматривать как квантовый туннельный эффект. Наиболее эффективно просачиваются частицы с длиной волны де Бройля, сравнимой с радиусом чёрной дыры.

Расчёты показывают, что на ранних этапах эволюции Вселенной, начиная с планковских времён и до одной секунды, могли образовываться чёрные дыры с массами от планковских масс до $10^5 M_{\odot}$ (см. обзор Б. Карра (B. J. Carr) [1]). Причём, чёрные дыры с массами меньше 10^{15} г образовались, когда возраст Вселенной не превышал 10^{-25} с, и к настоящему времени должны испариться из-за эффекта Хокинга. То есть до нашего времени дожили массивные первичные чёрные дыры с массами свыше 10^{15} г, излучение которых приходится на диапазон

энергий гамма-квантов менее 10 МэВ. Так, чёрные дыры с массами $2,5 \cdot 10^{27}$ г (сравнимые с массой Земли) образовались, когда возраст Вселенной был всего $2 \cdot 10^{-15}$ с. Некоторые модели образования первичных чёрных дыр предполагают степенное распределение по массам первичных чёрных дыр, например $N(M) \sim M^{-2,5}$ [1]. Поэтому представляет большой интерес расчёт рентгеновского и гамма-излучения от чёрных дыр, распределённых по массам по степенному закону, и сравнение его с наблюдаемым гамма-фоном Вселенной.

Методика расчёта

Итак, согласно Хокингу, благодаря квантовым эффектам гравитации чёрная дыра будет излучать как абсолютно чёрное тело с максимумом излучения, приходящимся на длину волны, сравнимую с радиусом чёрной дыры:

$$\lambda_{\max} = r_g = \frac{2GM}{c^2} = 1,5 \cdot 10^{-28} \text{ М} \cdot \text{см}. \quad (1)$$

Температура излучения с её поверхности:

$$T = \frac{0,29}{\lambda_{\max}} = \frac{b}{\lambda_{\max}} = \frac{0,29c^2}{2GM} = \frac{1,96 \cdot 10^{27}}{\text{М}} \text{ К}.$$

Максимум излучения приходится на частоту:

$$\nu_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\max}} = \frac{c^3}{2GM} = \frac{a}{M} = \frac{2 \cdot 10^{38}}{\text{М}} \text{ Гц}. \quad (2)$$

Полная мощность излучения (светимость) чёрной дыры равна:

$$L = \sigma T^4 \cdot 4\pi r_g^2 = \pi \frac{\sigma b^4 c^4}{G^2 M^2} = \pi (0,29)^4 \frac{\sigma c^4}{G^4} \frac{1}{M^2} = 2,3 \cdot 10^{50} \frac{1}{M^2} \frac{\text{Эрг}}{\text{с}}. \quad (3)$$

Масса чёрной дыры уменьшается со временем по закону:

$$M = \sqrt[3]{M_0^3 - 3\pi \frac{\sigma b^4 c^4}{G^2} t} = \sqrt[3]{M_0^3 - 7,2 \cdot 10^{30} t}.$$

Из этой формулы следует, что время испарения чёрной дыры ($M = 0$) равно:

$$t_{\text{исп}} = \frac{G^2}{3\pi \sigma b^4 c^2} M_0^3 = 1,4 \cdot 10^{-31} \text{ М}^3 \cdot \text{с}. \quad (4)$$

При возрасте Вселенной $t_{\text{Вс}} = 1/H = 13 \cdot 10^9$ лет, все первичные чёрные дыры с массами меньше $1,4 \cdot 10^{16}$ г должны испариться, причём от последних в настоящее время должно наблюдаться гамма-излучение на частотах $1,4 \cdot 10^{22}$ Гц (соответствует энергии гамма-квантов около 40 МэВ.). Если имеется какое-то распределение первичных чёрных по массам, то в окрестностях этой частоты должно наблюдаться излучение от этих чёрных дыр.

Примем для расчётов коэффициента излучения одной чёрной дыры выражение:

$$p(\nu) = \frac{1}{4\pi} L \cdot \delta(\nu - \nu_{\max}) \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{Гц} \cdot \text{ср}}.$$

Если концентрация чёрных дыр с массой M имеет степенной вид $N(M) = \text{КМ}^{-\gamma} / \text{г} \cdot \text{см}^3$, то коэффициент излучения единицы объёма от этих чёрных дыр имеет вид:

$$\begin{aligned} J(\nu) &= \int p(\nu) N(M) dM = \frac{1}{4} \pi \frac{\sigma b^4 c^4}{G^2} \int \frac{N(M)}{M^2} \delta\left(\nu - \frac{a}{M}\right) dM = \\ &= \frac{1}{4} \pi \frac{\sigma b^4 c^4}{G^2} K a^{-\gamma-1} \nu^{\gamma} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{Гц} \cdot \text{ср}} = \\ &= 1,6 \cdot 1053 K (2 \cdot 1038)^{-\gamma-1} \nu^{\gamma}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь, для расчётов, мы экстраполировали функцию Планка δ -функцией с максимумом на частоте (2).

Обсуждение результатов и выводы

Из полученных выражений видно, что спектральный индекс излучения Хокинга от степенного распределения чёрных дыр по массам равен показателю степенного спектра распределения чёрных дыр по массам с обратным знаком.

О природе гамма-фона Вселенной

Рис. 1. Спектр фонового излучения Вселенной в различных диапазонах частот /

Fig. 1. Background radiation spectrum of the Universe in different frequency ranges.

Источник: [2; 3].

В диапазоне энергий гамма-квантов 1–100 МэВ интенсивность гамма-квантов фонового излучения $I(E) = 0,011 \cdot E^{-2,3}$ фот/см²с · МэВ · ср, что соответствует спектральной интенсивности гамма-фона в диапазоне частот 10²⁰ – 10²² Гц (см. рис. 1 и более подробный рис. 2):

$$I(\nu) = 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot \nu^{-1,3} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{с} \cdot \text{Гц} \cdot \text{ср}}. \quad (6)$$

Если предположить, что гамма-излучение в этом диапазоне образуется за счёт излучения первичных чёрных, тогда имеем $N(M) = KM^{1,3}$ в диапазоне масс $1,6 \cdot 10^{16} - 1,6 \cdot 10^{14}$ г.

Рис. 2. Спектральное распределение интенсивности диффузного гамма-фона Вселенной в диапазоне 1–100 МэВ / Fig. 2. Spectral distribution of the intensity of the diffuse gamma background of the Universe in the range of 1–100 MeV.

Источник: [2; 3].

Чтобы рассчитать количество первичных чёрных дыр воспользуемся соотношением (5). Так как возраст Вселенной $t_{\text{вс}}$ в настоящее время оценивается в $\approx 13,5$ млрд. лет или в $4,2 \cdot 10^{17}$ с, а расстояние до горизонта событий Вселенной $l_{\text{вс}} \sim ct_{\text{вс}} \approx 1,3 \cdot 10^{28}$ см, то, полагая, что первичные чёрные дыры заполняют Вселенную однородно и изотропно, легко рассчитать интенсивность излучения от всех чёрных дыр по лучу зрения $I(\nu) = j(\nu) \cdot l_{\text{вс}}$. Для нас представляет интерес гамма-фон в диапазоне энергий квантов от нескольких МэВ и выше. Полагая в (5) $\gamma = -1,3$, получаем для теоретического значения интенсивности гамма-фона от первичных чёрных дыр $I(\nu) = K \cdot 5 \cdot 10^{91} \cdot \nu^{-1,3} \text{эрг/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Гц} \cdot \text{ср}$. Сравнивая это значение с наблюдаемой интенсивностью (7), определяем $K = 1,3 \cdot 10^{-94}$. Таким образом, распределение первичных чёрных дыр по массам имеет вид:

$$N(M) = 1,3 \cdot 10^{-94} M^{1,3} \text{ 1/г} \cdot \text{см}^3, 1,6 \cdot 10^{14} < M < 1,6 \cdot 10^{16} \text{ г.}$$

Концентрация чёрных дыр и суммарная плотность их массы в рассматриваемом интервале масс, соответственно, равны: $N = 1,410^{-53} \text{ 1/см}^3$ и $\rho = 10^{-35} \text{ г/см}^3$. При такой концентрации среднее расстояние между первичными чёрными ды-

рами составляет около $3 \cdot 10^4$ астрономических единиц. Так что обнаружить их очень трудно.

Если предположить, что полученное из наблюдений гамма-фона распределение первичных чёрных дыр тянется до больших масс, например до масс $5 \cdot 10^{21}$ г, то средняя плотность их массы составит около $0,25 \cdot 10^{-29}$ г/см³, что сравнимо с оценкой плотности массы тёмной материи во Вселенной [4; 5]. При этом основное количество и масса чёрных дыр сосредоточена в больших массах. Интересно, что в этом случае концентрация чёрных дыр составит около $2,2 \cdot 10^{-41}$ 1/см³. То есть среднее расстояние между первичными чёрными дырами с массами около $5 \cdot 10^{21}$ г составляет всего одну астрономическую единицу и в объёме сферы с радиусом орбиты Юпитера их будет около полусотни. Эти чёрные дыры как пылинки с размерами около 10^{-6} см, имеют массы, сравнимые с массами небольших астероидов (например, астероид Немауза имеет массу $9 \cdot 10^{20}$ г и размер 40 км). Они излучают в инфракрасном и оптическом диапазонах мощность около 1 Вт.

Если рассмотреть модель Карра [1] образования чёрных дыр в ранней Вселенной из флуктуаций в среде с радиационным уравнением состояния [4; 5], то их спектр имеет степенной вид $N(M) = K \cdot M^{-2,5}$, и их основное количество и масса приходится на самые малые массы. Если это так, то интенсивность гамма-излучения от них должна иметь вид $I(\nu) \sim \nu^{2,5}$, что противоречит наблюдениям.

Статья поступила в редакцию 14.12.2020 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Carr B. J. Primordial Black Holes – Recent Developments // Relativistic astrophysics: Proceedings, 22nd Texas Symposium (Stanford, USA, December 13–17, 2004) / ed. by P. Chen, E. D. Bloom, G. Madejski, V. Petrosian. Stanford: Stanford University, 2004. 1 CD.
2. Pohl M. Gamma ray astronomy // Proceedings of International Cosmic Ray Conference. Vol. 1. / ed. R. Schlickeiser. Hamburg: Copernicus Gesellschaft, 2001. P. 147–161.
3. Spectrum of the Isotropic Diffuse Gamma-Ray Emission Derived from First-Year Fermi Large Area Telescope Data / Abdo A. A. et al. (Fermi LAT Collaboration) // Physical Review Letters. 2010. Vol. 104. Iss. 10. P. 101101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.101101.
4. Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего большого взрыва. М.: ЛЕНАНД, 2016. 616 с.
5. Bambi C., Dolgov A. D. Introduction to Particle Cosmology: The Standard Model of Cosmology and its Open Problems. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2016. 251 p. (Series: UNITEXT for Physics).

REFERENCES

1. Carr B. J. Primordial Black Holes – Recent Developments. In: Chen P., Bloom E. D., Madejski G., Petrosian V., eds. *Relativistic astrophysics: Proceedings, 22nd Texas Symposium (Stanford, USA, December 13–17, 2004)*. Stanford, Stanford University Publ., 2004. 1 CD.
2. Pohl M. Gamma ray astronomy. In: Schlickeiser R., ed. *Proceedings of International Cosmic Ray Conference. Vol. 1*. Hamburg, Copernicus Gesellschaft Publ., 2001, pp. 147–161.
3. Abdo A. A. et al. (Fermi LAT Collaboration). Spectrum of the Isotropic Diffuse Gamma-Ray Emission Derived from First-Year Fermi Large Area Telescope Data. In: *Physical Review Letters*, 2010, vol. 104, iss. 10, pp. 101101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.101101.

4. Gorbunov D. S., Rubakov V. A. *Vvedenie v teoriyu rannei Vselennoi: Teoriya goryachego bol'shogo vzryva* [An Introduction to Theory of the Early Universe: The Hot Big Bang Theory]. Moscow, LENAND Publ., 2016. 616 p.
5. Bambi C., Dolgov A. D. *Introduction to Particle Cosmology: The Standard Model of Cosmology and its Open Problems*. Berlin, Springer-Verlag Heidelberg Publ., 2016. 251 p. (Series: UNITEXT for Physics).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чаругин Виктор Максимович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики Московского государственного педагогического университета; профессор кафедры общей физики Московского государственного областного университета;
e-mail: charugin2010@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Victor M. Charugin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Department of Theoretical Physics, Moscow State Pedagogic University; Prof., Department of General Physics, Moscow Region State University;
e-mail: charugin2010@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Чаругин В. М. Первичные чёрные дыры, диффузное гамма-излучение Вселенной и возможная природа тёмной материи // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. № 4. С. 66–72.
DOI: 10.18384/2310-7251-2020-4-66-72

FOR CITATION

Charugin V. M. Primordial black holes, diffuse gamma radiation of the Universe and possible nature of dark matter. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, 2020, no. 4, pp. 66–72.
DOI: 10.18384/2310-7251-2020-4-66-72