

УДК 53

*Дёмина, Н.Ф.,
к.п.н., доцент КГПИ
Москаленко, А.Т.,
студент 4 курса, КГПИ,
г. Костанай, Казахстан*

ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЁРНОЙ ДЫРЫ КАК ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

Аннотация

В статье рассматривается излучение Хокинга как процесс выделения энергии микроскопическими чёрными дырами. Исследованы динамика и состав излучения, подробно изучены характеристики квантового испарения в диапазоне масс чёрных дыр, потенциально пригодном для практического использования их энергии.

Ключевые слова: чёрная дыра, излучение Хокинга, квантовое испарение.

1. Введение.

Чёрные дыры являются одними из наиболее интересных объектов во Вселенной. Долгое время они отвергались научным сообществом, и лишь в 1960-х годах физики утвердились во мнении, что существование чёрных дыр является неизбежным следствием общей теории относительности.

В 1974 году британский физик С. Хокинг пришёл к выводу, что гравитационное поле чёрных дыр должно рождало частицы из физического вакуума. Чёрные дыры, таким образом, могут быть рассмотрены как термодинамические объекты с температурой

$$T = \frac{\hbar g}{2\pi c k}, \quad (1)$$

где \hbar – приведённая постоянная Планка, g – поверхностная гравитация чёрной дыры, c – скорость света в вакууме, k – постоянная Больцмана [10].

Процесс рождения частиц чёрными дырами был назван излучением Хокинга. В результате этого процесса чёрные дыры теряют энергию, то есть испаряются. Данный эффект чрезвычайно мал для астрофизических чёрных дыр, однако для менее массивных дыр (их называют микроскопическими) мощность излучения может достигать огромных величин. Таким образом, микроскопические чёрные дыры можно рассматривать как мощные источники энергии. В будущем человечество могло бы создавать искусственные чёрные дыры и использовать их энергию в практических целях.

Несмотря на то, что существует большое число публикаций, посвящённых излучению Хокинга, динамика процесса испарения освещена недостаточно подробно, равно как и потенциал использования чёрных дыр в качестве источников энергии. Поиск альтернативных источников энергии является актуальным в современном мире в связи с повышением потребностей человека в энергии и исчерпанием традиционных источников.

2. Обсуждение.

Излучение Хокинга можно исследовать на примере шварцшильдовской чёрной дыры (не имеющей заряда и вращательного момента). Это связано с тем, что чёрная дыра теряет свой заряд и угловой момент за время значительно меньшее, чем характерное время испарения чёрной дыры. Иными словами, любая чёрная дыра в ходе своей эволюции превращается во шварцшильдовскую задолго до окончания процесса испарения [7].

Температура шварцшильдовской чёрной дыры определяется формулой:

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k G M}, \quad (2)$$

где G – гравитационная постоянная, M – масса чёрной дыры.

Как видно из формулы, температура чёрной дыры обратно пропорциональна её массе. Так, для чёрной дыры солнечной массы она составляет $6 \cdot 10^{-8}$ К. Хокингское излучение такой чёрной дыры полностью пренебрежимо [4]. Сколько-нибудь заметную интенсивность излучение Хокинга имеет лишь для чёрных дыр малой массы (не более 10^{12} кг [3]).

Главной характеристикой испарения чёрной дыры является мощность хокингского излучения. Для её определения воспользуемся формулой:

$$P = w \frac{f(T)}{M^2}, \quad (3)$$

где $w = 4,806 \cdot 10^{33}$ Вт кг², $f(T)$ – безразмерный параметр, являющийся функцией температуры и эффективно учитывающий вклад в излучение различных сортов частиц [1], [12]. Как видно, мощность хокингского излучения обратно пропорциональна квадрату её массы, то есть чем меньше становится чёрная дыра, тем интенсивнее она испаряется.

Время жизни чёрной дыры будет определяться по формуле:

$$\tau = \frac{c^2}{3w} \frac{M^3}{f(T)}. \quad (4)$$

3. Результаты.

Для исследования излучения Хокинга была разработана компьютерная программа, которая моделирует процесс испарения шварцшильдовской чёрной дыры в лабораторных условиях. Программа визуализирует процесс квантового распада чёрной дыры и вычисляет характеристики данного процесса, позволяя увидеть, каким образом с течением времени изменяются её параметры.

В результате моделирования были получены графики зависимости основных характеристик испаряющейся чёрной дыры от времени (массы, средней плотности, температуры, мощности излучения и выделенной энергии).

Представим график зависимости излучённой энергии от времени:

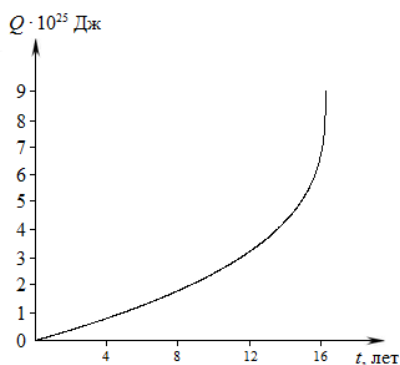


Рисунок 1 – Зависимость излучённой энергии от времени $Q(t)$

Для использования энергии, выделяемой при хокингском излучении, целесообразно использовать чёрную дыру с такой массой, чтобы время её жизни составляло как минимум несколько суток. Так, чёрная дыра с массой 10^8 кг испаряется за 128 часов, то есть 5,35 суток.

Будем рассматривать данное значение массы в качестве нижнего предела масс чёрных дыр, потенциально пригодных для использования в качестве источников энергии. Верхний предел установим равным 10^{10} кг: процесс испарения такой чёрной дыры будет продолжаться более 19 тысяч лет.

В результате компьютерного моделирования испарения чёрных дыр с массами от 10^8 до 10^{10} кг была составлена таблица с основными характеристиками процесса испарения.

Таблица 1 – Параметры чёрных дыр в диапазоне масс $10^8 - 10^{10}$ кг.

M , Мт	r , ам	$T \cdot 10^{13}$, К	P , ПВт	dM/dt , кг/с	$Q \cdot 10^{26}$, Дж	τ , лет
0,1	0,149	122,7	6422	71,45	0,09	0,015
0,2	0,297	61,35	1588	17,67	0,18	0,12
0,3	0,446	40,90	677,5	7,538	0,27	0,41
0,4	0,594	30,67	374,9	4,171	0,36	1
0,5	0,743	24,54	237,0	2,637	0,45	2
0,6	0,891	20,45	163,0	1,814	0,54	3,4
0,7	1,040	17,53	118,9	1,323	0,63	5,5
0,8	1,188	15,34	90,47	1,007	0,72	8,3
0,9	1,337	13,63	71,12	0,791	0,81	11,8
1,0	1,485	12,27	57,37	0,638	0,90	16,3
2,0	2,970	6,135	13,94	0,155	1,8	134,3
3,0	4,456	4,090	6,048	0,067	2,7	462,1
4,0	5,941	3,067	3,326	0,037	3,6	1116
5,0	7,426	2,454	2,083	0,023	4,5	2217
6,0	8,911	2,045	1,417	0,016	5,4	3893
7,0	10,40	1,753	1,021	0,011	6,3	6282
8,0	11,88	1,534	0,767	0,009	7,2	9520
9,0	13,37	1,363	0,595	0,006	8,1	13760
10,0	14,85	1,227	0,474	0,005	9,0	19140

Состав хокинговского излучения чёрной дыры (то есть различные сорта элементарных частиц, испускаемых ею) существенно зависит от её температуры. Чем выше температура, тем более массивные частицы могут ею излучаться. Чёрные дыры, масса которых превышает 10^{14} кг, могут испускать только безмассовые частицы (фотоны и гравитоны), а также нейтрино и антинейтрино всех сортов.

По мере испарения чёрная дыра начинает также излучать электрон-позитронные пары, а затем и более тяжёлые частицы: мюоны и пионы. На финальной стадии испарения чёрная дыра испускает кварки и глюоны, которые выбрасываются в виде струй (джетов) [6]. В результате адронизации кварки и глюоны образуют адроны (протоны, нейтроны и их античастицы) [11], [13].

В диапазоне масс $10^8 - 10^{10}$ кг излучение чёрных дыр представлено преимущественно четырьмя типами элементарных частиц:

- 1) фотонами;
- 2) нейтрино и антинейтрино;
- 3) электронами и позитронами;
- 4) протонами и антипротонами.

В результате исследования были получены формулы для определения мощности излучения каждого типа:

$$P_\gamma = \frac{13,44 \cdot 10^{34}}{M^{2,1}} \text{Вт}, \quad P_{\nu\bar{\nu}} = \frac{24,17 \cdot 10^{34}}{M^{2,1}} \text{Вт}, \quad (5-6)$$

$$P_{e^\pm} = \frac{10,40 \cdot 10^{34}}{M^{2,1}} \text{Вт}, \quad P_{p\bar{p}} = \frac{19,95 \cdot 10^{36}}{M^{2,4}} \text{Вт}. \quad (7-8)$$

Расчёты показывают, что для чёрных дыр с массами $10^8 - 10^{10}$ кг почти 50% излучаемой энергии уносится нейтрино и антинейтрино. Около 25% энергии приходится на электромагнитное излучение, 20% – электроны и позитроны. Доля энергии, высвобождаемой в виде протонов и антипротонов, невелика и заметно убывает по мере увеличения массы чёрной дыры: с 14% для чёрной дыры массой 10^8 кг до 4% для дыры массой 10^{10} кг.

Полученные результаты позволяют оценить, какая часть энергии излучения чёрной дыры может быть использована в практических целях. Нейтрино и антинейтрино, которые

очень слабо взаимодействуют с веществом, просто унесут часть энергии, не оставляя возможности задержать её [8], [14]. Однако энергия, излучаемая по другим каналам (фотоны, электроны и позитроны, протоны и антипротоны), может быть успешно использована.

4. Выводы.

Чёрные дыры всерьёз рассматриваются как потенциальный источник энергии будущего многими учёными, такими как С. Хокинг [9], У. Кауфман [2], И.Д. Новиков [5] и др. Главным преимуществом таких источников энергии является отсутствие загрязнения окружающей среды. Наиболее безопасным вариантом было бы расположить чёрную дыру на околоземной орбите, посылая её энергию на Землю в виде электромагнитного излучения.

Рассматриваемый в работе диапазон масс чёрных дыр ($10^8 - 10^{10}$ кг) является наиболее подходящим для создания искусственных дыр, которые будут достаточно высокотемпературными для возможности создавать большое количество энергии, и в то же время достаточно массивными, для того чтобы не могли отдать всю свою энергию сразу.

Микроскопические чёрные дыры можно использовать как универсальные преобразователи всякой материи напрямую в энергию. Эта энергия могла бы использоваться, например, чтобы создать новые чёрные дыры и новые генераторы энергии.

В настоящее время создание и применение искусственных чёрных дыр недоступно современным технологиям, представляя собой невероятно сложную техническую задачу. Тем не менее, темп развития науки и технологий достаточно высок, так что использование чёрных дыр может стать вполне реальным в этом или следующем столетии.

Список литературы

- 1 Березин, В.А. Маркова и квантовые чёрные дыры [Текст] / В.А. Березин, М.А. Максимоны // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – Т. 29. – Вып. 3. – 1998.
- 2 Кауфман, У. Космические рубежи теории относительности [Текст] / У. Кауфман. – М.: Мир, 1981. – 352 с.
- 3 Квантовая теория чёрных дыр [Текст] / Составители: Ю.И. Геллер, И.В. Жабрун, [Красноярский государственный университет]. – Красноярск: [б.и.], 2003. – 10 с.
- 4 Новиков, И.Д. Чёрные дыры и Вселенная / И.Д. Новиков. – М.: Молодая гвардия, 1985. – 190 с.
- 5 Новиков, И.Д. Чёрные дыры во Вселенной [Текст] / И.Д. Новиков. – М.: Знание, 1977.
- 6 Новиков, И.Д. Чёрные дыры во Вселенной [Текст] / И.Д. Новиков // Успехи физических наук. – Т. 171. – № 3. – 2001.
- 7 Bambeck, D. Effects of nonzero neutrino masses on black hole evaporation [Text] / D. Bambeck, W.A. Hiscock. – [w.s.]: [w.p.], 2005.
- 8 Crane L. Are black hole starships possible? [Text] / L. Crane, S. Westmoreland. – [w.s.]: [w.p.], 2009.
- 9 Hawking, S. Humans could use mini black hole to power world's electricity supply [Electronic resource] / S. Hawking. – Access mode: www.express.co.uk/news/science/640496/End-of-the-world-Stephen-Hawking-black-hole-could-destroy-us.
- 10 Hawking, S.W. Particle Creation by Black Holes [Text] / S.W. Hawking // Commun. Math. Phys. 43, 199. – 1975.
- 11 Kapusta, J. The Last Eight Minutes of a Primordial Black Hole [Text] / J. Kapusta. – [w.s.]: [w.p.], 1999.
- 12 MacGibbon, J.H. Quark and gluon-jet emission from primordial black holes [Text]: The instantaneous spectra / J.H. MacGibbon, B.R. Webber // Physical Review D. – Vol. 41. – No. 10. – 1990. – pp. 3052-3079.
- 13 MacGibbon, J.H. Primordial Black Holes [Text] / J.H. MacGibbon // 5th Fermi Symposium. – Nagoya: [w.p.]. – Japan: [w.p.]. – 2014.
- 14 Semiz, I. Black hole as the ultimate energy source [Text] / I. Semiz // American Journal of Physics – Vol. 63. – No. 2. – 1995. – pp. 151-156.

Материал поступил в редакцию: 17.03.2017

ДЁМИНА, Н.Ф., МОСКАЛЕНКО, А.Т.

ҚАРА ҚҰРДЫМ ЭНЕРГИЯ КӨЗІ РЕТІНДЕ

Мақалада Хокинг сәулеленуі микроскопиялық қара құрдымдармен энергия шығарылуы процесі ретінде қарастырылады. Қара құрдымдардың энергиясын әлеуетті пайдалануға жарамды массалар ауқымы ішінде сәулелену динамикасы мен құрамы, кванттық буланудың сипаттамалары зерттелген.

Мақаланың мәнін ашатын сөздер: қара құрдым, Хокинг сәулеленуі, кванттық булану.

DEMINA, N.F., MOSKALENKO, A.T.

BLACK HOLE AS AN ENERGY SOURCE

The article considers Hawking radiation as a process of energy output by microscopic black holes. Radiation dynamics and composition are investigated, as well as characteristics of quantum decay in the range of black holes masses which is potentially suitable for practical use of their energy.

Keywords: black hole, Hawking radiation, quantum decay.