

К ВОЗМОЖНОСТИ ПРИСУТСТВИЯ ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР В КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

В. В. Тихомиров, С. Э. Юралеви́ч

Предполагается, что на ранних стадиях расширения Вселенной, когда она была очень горячей и плотной, вследствие флуктуаций плотности [1, 2] могли образовываться черные дыры малой массы (от 10^{-5} г до массы Солнца и даже выше). Такие первичные черные дыры (ПЧД) могли играть заметную роль в эволюции Вселенной. Во-первых, вследствие хокинговского испарения [3] ПЧД с массой $M < 10^{15}$ г могли бы влиять на величину удельной энтропии и зарядовую асимметрию Вселенной [4]. Во-вторых, даже незначительного количества ПЧД достаточно, чтобы изменить динамику космологического нуклеосинтеза [5] и кинетику рекомбинации водорода [6]. ПЧД также могли оказать влияние на расширение Вселенной и сейчас, возможно, вносят свой вклад в «темную материю».

Помимо прямого влияния на эволюцию Вселенной, в силу относительно слабого взаимодействия с веществом, ПЧД должны нести уникальную информацию о наиболее ранних этапах этой эволюции, в том числе о флуктуациях плотности [7], возможных фазовых переходах [8, 9] и изменениях гравитационной постоянной [10]. Поэтому, если бы ПЧД были обнаружены, они смогли бы дать неоценимую [11] информацию о самых ранних фазах Большого взрыва.

Важность проблемы существования ПЧД для астрофизики и космологии стимулирует стремление ученых их обнаружить. Основным методом поиска ПЧД являются попытки зарегистрировать их хокинговское излучение, вследствие которого конечная стадия испарения должна напоминать взрыв. Первостепенным фактором, ограничивающим возможности данного метода, является не слишком большой масштаб энергии, выделяемый ПЧД на конечном этапе испарения. Кроме того, данный метод применим лишь для обнаружения ПЧД, начальные массы которых лежат в весьма узком диапазоне $\Delta M / M^* < 10^{-9}$ ($M^* \approx 5 \cdot 10^{14}$ г – «хокинговская масса» [12]), который соответствует интервалу времен испарения, равному времени наблюдения $\Delta t \sim 20$ лет. Поэтому поиск ПЧД в космическом пространстве пока не принес значительных успехов [12, 3]. В настоящее время лишь сопоставление нейтринного фонового излучения с предсказанием спектра масс ПЧД [13] может свидетельствовать об отсутствии явных признаков проявления существования ПЧД с $M \leq 10^{15}$ г.

Более успешными обещают быть попытки поиска ПЧД в планетах [14], нейтронных звездах [2, 15] и других космических объектах. Предсказывались возможности поглощения первичной черной дырой нейтронной звезды [2, 15] и планеты (Земли) [14]. Следствиями этих предсказаний мог бы стать вывод о невозможности присутствия ПЧД в Земле [14], а также модель происхождения наиболее мощных внегалактических гамма-всплесков с энергией вплоть до 10^{47} Дж [15]. Так как достаточно легкие ПЧД уже испарились, то наиболее обещающим выглядит поиск ПЧД с «хокинговской массой» или на порядок – два большей.

Для проведения подобных исследований необходима модель взаимодействия ПЧД с веществом космических объектов. В связи с этим нами развита модель взаимодействия ПЧД с веществом нейтронной звезды (НЗ), белого карлика (БК) и планеты. Эта модель основана на общерелятивистской модели сферически симметричной адиабатической аккреции паскалевой жидкости, в качестве последней выступает вырожденная ферми-жидкость (газ). Применимость модели аккреции вырожденного электронного ферми-газа обоснована для случая БК и (при достаточно высоких атомных номерах вещества и массах ПЧД) планет. Показано, что вырожденность вещества БК не нарушается ни процессом сжатия, который обусловлен аккрецией, ни нагревом хокинговским излучением самой ПЧД массы $M > M^*$. Действительно, в процессе адиабатического сжатия энтропия, приходящаяся на одну частицу, остается постоянной. Соответствующий этому закону рост температуры не меняет отношения теплового вклада в среднюю энергию частицы к энергии Ферми ε_F , благодаря чему при адиабатическом сжатии вещество остается вырожденным. Оценки же максимальной температуры, до которой может быть нагрето хокинговским излучением вещество БК, также показывают, что эта температура далека от температуры вырождения.

Заметим, что гравитационное поле ПЧД с массой $M \geq M^*$ легко разрушает ближайшие атомы, превращая вещество Земли в электронный ферми-газ. Однако, в отличие от БК и НЗ, применимость модели вырожденного нерелятивистского ферми-газа в случае Земли требует дополнительного обоснования. Действительно, вещество вблизи ПЧД (на расстояниях порядка нескольких метров) может быть нагрето хокинговским излучением до температуры, превышающей температуру вырождения в «звуковой точке». Наши оценки показали, что именно так и происходит при $M \gg M^*$, когда нагрев является особенно сильным.

Однако в случае вещества центра Земли, состоящего из железа, существует механизм восстановления вырожденности вещества в «звуковой точке», проявляющийся при $M \geq M^*$, когда степень ионизации железа при нагреве его хокинговским излучением далека от полной. Сам механизм состоит в эффективном охлаждении сжимаемого вещества, в основе которого лежит увеличение концентрации носителей тепла (свободных электронов) в процессе ионизации давлением, которое возрастает в процессе аккреционного сжатия. В результате оказывается, что нагретое хокинговским излучением вещество Земли, находящееся на достаточно больших расстояниях от ПЧД в состоянии плазмы, содержащей частично ионизованные атомы железа, по мере приближения к «звуковой точке» превращается в почти вырожденный ферми-газ. Так, например, при $M = 10 M^*$ его тепловая энергия составляет 1 % от энергии полностью вырожденного ферми-газа. Именно это и позволяет утверждать, что модель вырожденного нерелятивистского ферми-газа для вещества в центре Земли становится вполне адекватной, начиная с масс ПЧД, в несколько раз превышающих M^* .

Радиальная аккреция сопровождается сжатием и ускорением вещества по мере приближения к ПЧД. Анализ уравнений сохранения импульса и числа частиц показывает, что ускорение аккрецирующего вещества приводит к появле-

нию особой «звуковой точки», в которой скорость аккрецирующего вещества начинает превышать скорость звука. Условия непрерывности скорости и плотности вещества в «звуковой точке» позволяют рассчитать многие характеристики вещества, не решая дифференциальных уравнений. При этом обычным является наличие одной «звуковой точки». Нами, однако, показано, что аккреционное течение нерелятивистского электронного ферми-газа вещества планет и нерелятивистских БК может иметь две такие точки. Их возникновение всецело определяется соотношением релятивистской и кулоновской поправок к уравнению состояния нерелятивистского вырожденного ферми-газа электронов, без которых «звуковых точек» в его аккреционном течении вообще не возникает.

Характеристики аккреционного течения позволяют рассчитать темп аккреции массы покоя на ПЧД. Для различных видов холодной плотной материи он оказывается пропорциональным квадрату массы ПЧД. Вследствие этого закон роста массы ПЧД в процессе аккреции не зависит от конкретного вида аккрецирующей материи и имеет простой и в то же время весьма общий вид:

$$M(t) = \frac{M_0}{1 - t/T}, \quad (1)$$

где $T \propto 1/M_0$ – характерное время поглощения космического объекта, M_0 – начальная масса ПЧД. В соответствии с (1) основной вклад в полное время поглощения будет вносить начальная стадия, на которой масса ПЧД $M(t) \sim M_0$ существенно меньше массы космического объекта. С другой стороны, поглощение основной части массы последнего будет происходить за весьма короткое время $\Delta t \sim (M_0/M)T \ll 1$ с.

Рассмотрение аккреции вещества НЗ осложняется недостаточным знанием его уравнения состояния при плотностях, превышающих ядерную плотность $2,7 \cdot 10^{17}$ кг/м³ в несколько раз и более. Так уравнение Бете – Джонсона и ряд других давно известных уравнений состояния близки к адиабате с показателем $\Gamma > 2$ и при плотностях, достигающихся в «звуковой точке», приводят к скорости звука, превосходящей скорость света.

Это, безусловно, означает нарушение применимости уравнений состояния с высоким значением показателя адиабаты, в пользу которой говорит и неизбежное при еще больших плотностях превращение ядерного вещества в релятивистскую кварк-глюонную плазму (КГП). Последняя характеризуется показателем адиабаты $\Gamma = 4/3$, не приводящим ни к каким осложнениям при нахождении особой точки. Однако подстановка уравнения состояния ультрарелятивистской КГП в уравнения аккреции приводит к плотности в «звуковой точке», всего в несколько раз превышающей ядерную. Поскольку при таких плотностях КГП заведомо не возникает, нами был сделан вывод о неприменимости в особой точке аккреционного течения вещества НЗ как «классических» уравнений состояния ядерного вещества, так и уравнения состояния КГП.

В качестве «промежуточного» уравнения состояния, отражающего эффективное убывание показателя адиабаты задолго до возникновения КГП, может быть использовано уравнение состояния Григоряна – Саакяна [16]. Соответствующая этому уравнению зависимость времени поглощения НЗ черной дырой массы

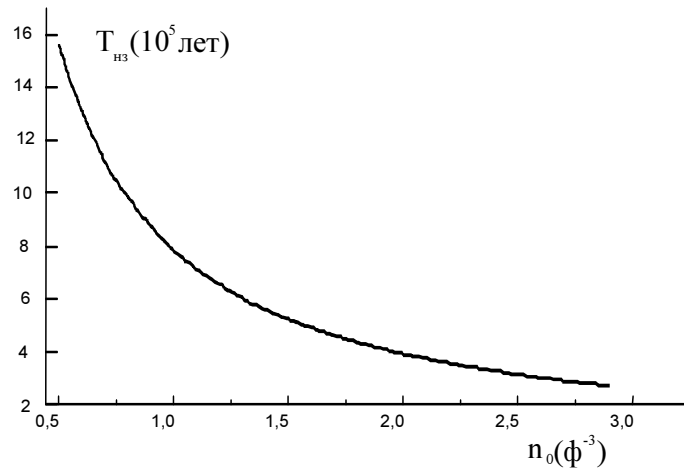


Рис. 1. График зависимости времени поглощения нейтронной звезды от концентрации вещества в ее центре

$M = 10^{15}$ г представлена на рис. 1. Нетрудно видеть, что это время не превышает нескольких миллионов лет и находится в согласии с предсказаниями Хокинга [2] и авторов работы [15].

Увеличение энергии Ферми ε_F нейтронов до нескольких сотен МэВ при сжатии делает энергетически выгодным образование других адронов, в первую очередь, гиперонов. Образование этих частиц будет сопровождаться испусканием нейтрино. Интенсивность их потока будет нарастать вместе с увеличением массы ПЧД вследствие аккреции. Энергия, передаваемая нейтрино при их образовании, может достигать нескольких процентов от энергии покоя НЗ. Поглощение нейтринного потока наружными слоями НЗ будет вызывать их интенсивный разогрев и взрывной сброс, напоминающий взрыв сверхновой.

В отличие от НЗ, уравнение состояния вещества БК известно достаточно хорошо. Наши расчеты показывают, что время поглощения БК с максимальной плотностью $3 \cdot 10^{13} \text{ кг/м}^3$ составляет порядка $10^8 \text{ лет}/(M_0/10^{15} \text{ г})$, а нерелятивистского БК и планеты – порядка $2,7 \cdot 10^{10} \text{ лет}/(M_0/10^{15} \text{ г})$ (рис. 2), причем последняя оценка практически не зависит от параметров объекта в отсутствие ПЧД. В соответствии с тем, что наземные детекторы нейтринного излучения с ограничениями не регистрируют нейтринное хокинговское излучение ПЧД, полученные оценки не могут полностью исключить присутствия в Земле ПЧД с массами $10^{15} \text{ г} \leq M_0 \leq 6 \cdot 10^{15} \text{ г}$. В то же время более тяжелые ПЧД уже поглотили бы Землю за время ее существования $4,5 \cdot 10^9 \text{ лет}$ и менее. Таким образом, развивая идею [15] о том, что ПЧД может инициировать коллапс НЗ, можно предсказать, что ПЧД, если они действительно существуют, могут также поглотить БК или планету.

Сжатие аккрецирующей материи БК будет увеличивать энергию Ферми ε_F электронов, инициируя нейтронизацию, которая сопровождается излучением нейтрино. В отличие от хокинговского излучения, интенсивность нейтринного

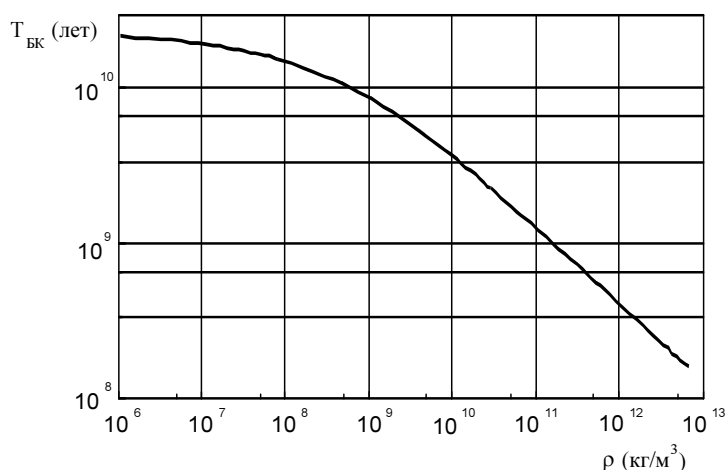


Рис. 2. График зависимости времени поглощения белого карлика от плотности вещества в его центре

излучения аккрецирующей материи будет возрастать с ростом массы ПЧД и породит на конечной стадии поглощения первичной черной дырой БК или планеты нейтринную вспышку. Для случая наиболее распространенных углеродных БК мы численно рассчитали процесс нейтронизации вещества в аккреционном потоке и оценили энергию этой вспышки, оказывающейся порядка 10^{43} Дж, что составляет несколько процентов от энергии вспышки сверхновой при гораздо меньшей длительности, не превышающей сотых долей секунды.

Обоснование возможностей и расчет характеристик катастрофических проявлений малых ПЧД позволят указать новые пути их поиска и установить более строгие ограничения на их распространенность.

Литература

1. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. // Астроном. журн. 1966. Т. 43. С. 758.
2. Hawking S. W. // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1971. Vol. 152. P. 75.
3. Hawking S. W. // Commun. Math. Phys. 1975. Vol. 43. P. 199.
4. Зельдович Я. Б. // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 24. С. 29.
5. Вайнер Б. В., Дрыжакова О. А., Насельский П. Д. // Письма в астроном. журн. 1978. Т. 4. С. 344.
6. Насельский П. Д. // Астрофизика. 1978. Т. 14. С. 145.
7. Liddle A. R., Green A. M. // Phys. Rep. 1998. Vol. 307. P. 125.
8. Carr B. I., MacGibbon I. H. // Phys. Rep. 1998. Vol. 307. P. 141.
9. Рубин С. Г., Сахаров С. А., Хлопов М. Ю. // ЖЭТФ. 2001. Т. 119. С. 1067.
10. Carr B., Gouyer C. // astro-ph / 0003027.
11. Новиков И. Д., Фролов В. П. // УФН. 2001. Т. 71, вып 3.
12. Общая теория относительности / Под ред. С. Хокинга и Израэля. М., 1983. С. 202.
13. Bugaev E. V., Konishchev K. V. // Astro-ph/0103265 v3.
14. Dokuchaev V. I., Volkova L. I. // Space Science Rev. 1995. Vol. 74. P. 467.
15. Derishev E. V., Kocharovsky V. V., Kocharovsky V. V. // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 70. С. 642.
16. Саакян Г. С. Физика нейтронных звезд. Дубна, ОИЯИ, 1995.

TO THE POSSIBILITY OF PRIMORDIAL BLACK HOLES PRESENCE IN COSMIC OBJECTS

V. V. Tikhomirov, S. E. Juralevich

If primordial black holes (PBH) were observed, they would give an invaluable information about the very early stages of Big Bang. However, the search of PBH in space was not a success yet. Attempts to find PBH in planets, neutron stars or other cosmic objects promise to be more productive. Because of the Hawking evaporation the search of PBHs with masses of about the Hawking mass $\approx 5 \cdot 10^{14}$ g or one-two orders more looks the most reasonable.

Such a search is in need of a model of PBH interaction with the substance of cosmic objects. For this purpose a model of spherical accretion of cold dense matter of various cosmic objects by a PBH is developed. In particular, the applicability of the model of degenerate electron fermi-gas for accretion of the substance of both white dwarfs and planets is grounded. It has been shown that the degeneracy of the substance of white dwarfs is not violated neither in the process of compression which accompanies the accretion, nor under the heating by the Hawking radiation of PBH with masses $M \geq 5 \cdot 10^{14}$ g. An existence of two sonic points of accretion flow of the planet substance is revealed. Their appearance is entirely determined by the ratio between relativistic and coulomb corrections to the equation of state of nonrelativistic degenerate fermi-gas which does not give rise to any sonic point without these corrections.

Since the equation of state of the neutron star matter is characterized both by the adiabatic index $\Gamma \geq 2$ and superluminal sound speed, its accretion flow could not be stable. A stable one is settled at any neutron star density, including subnuclear one, when its compression near the PBH drastically changes the equation of state, lowering its adiabatic index down to $\Gamma < 5/3$.

The rest mass accretion rates of the all kinds of cold dense matter mentioned turn out to be proportional to the PBH mass squared. A characteristic time $T_{\text{abs}} \propto 1/M_0$ of the cosmic object absorption by a PBH with an initial mass M_0 is naturally introduced in this case. The absorption time of a neutron star does not exceed several million years in accordance with the predictions of both Hawking and Derishev with Kocharovskies. That of relativistic white dwarfs with the maximum density $\approx 3 \cdot 10^{13}$ kg/m³ is in the range of $10^8 \text{ yr} / (M_0 / 10^{15} \text{ g})$. The absorption time of both planets and nonrelativistic white dwarfs amounts to $2.7 \cdot 10^{10} \text{ yr} / (M_0 / 10^{15} \text{ g})$. Along with the restrictions imposed by the unobserved Hawking neutrino radiation, the last estimate does not allow to exclude the presence of PBHs with masses $10^{15} \text{ g} \leq M_0 \leq 6 \cdot 10^{15} \text{ g}$ in the Earth, while the heavier PBHs would have absorbed the Earth for $4.5 \cdot 10^9$ years or less. Thus, developing the idea that a PBH can induce neutron star collapse, one can predict that PBHs, if they really exist, can absorb both white dwarfs and planets.

The compression of the accreted matter of both of them will increase the fermi energy of electrons inducing neutronization, accompanied by neutrino emission. Unlike the Hawking radiation, the intensity of the neutrino radiation from the accreted matter will increase with PBH mass increasing and give rise to the white dwarf and planet neutrino flash on the final stage of their absorption by a PBHs. The model developed allows both to evaluate the induced neutrino flux and to describe the influence of dense compressed accreting matter on the Hawking radiation which determines the state of matter surrounding PBHs in planets.