

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ: ТЕРМОДИНАМИКА, ИЗЛУЧЕНИЕ ХОКИНГА

Ляшко М.С.¹, Левоненко Ю.И.¹, студенты гр. 418702

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹
г. Минск, Республика Беларусь

Дорошевич И.П. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В данной работе рассматривается тема чёрных дыр, а также путь их образования. Освещены термодинамические свойства чёрных дыр, включая теорему об отсутствии волос, законы механики чёрных дыр и излучение Хокинга.

Ключевые слова: чёрная дыра, горизонт событий, гравитационный радиус, излучение Хокинга, теорема об отсутствии волос, термодинамика чёрных дыр, энтропия, космологические процессы.

Чёрная дыра – область пространства, в которой гравитационное притяжение настолько сильно, что ни вещество, ни излучение не могут эту область покинуть. Для находящихся там тел вторая космическая скорость должна была бы превышать скорость света, что невозможно, поскольку ни вещество, ни излучение не могут двигаться быстрее света. Поэтому из черной дыры ничто не может вылететь. Границу области, за которую не выходит свет, называют «горизонтом событий», или просто «горизонтом» черной дыры.

Чтобы поле тяготения смогло «запереть» излучение, создающая это поле, масса (M) должна сжаться до объема с радиусом, меньшим «гравитационного радиуса» $r_g = \frac{2Gm}{c^2}$. Значение гравитационного радиуса чрезвычайно мало по сравнению с привычным размером физических тел. Например, для Солнца с массой около $2 \cdot 10^{30}$ кг и радиусом около 700 тыс. км значение r_g 3 км. А для Земли ($M = 6 \cdot 10^{24}$ кг) значение r_g 1 см.

Очевидный путь образования черной дыры – коллапс ядра массивной звезды. Пока в недрах звезды не истощился запас ядерного топлива, ее равновесие поддерживается за счет термоядерных реакций (превращение водорода в гелий, затем в углерод, и т.д., вплоть до железа у наиболее массивных звезд) [1].

Термоядерные реакции поддерживают высокое давление в недрах звезды, препятствуя ее сжатию под действием собственной гравитации. Но со временем ядерное топливо истощается и звезда начинает сжиматься. Наиболее быстро сжимается ядро звезды и нагревает окружающую его оболочку. В итоге звезда теряет свои наружные слои. Расчеты показывают, что масса ядра звезды не превосходит трех масс Солнца; его сжатие будет остановлено давлением вырожденного вещества, и звезда превратится в белый карлик или нейтронную звезду. Но если масса ядра звезды более трех солнечных, то оно быстро уйдет под горизонт событий, став черной дырой. Как следует из формулы для r_g , черная дыра с массой 3 солнечных имеет гравитационный радиус 8,8 км [2].

Млечный Путь может содержать более 100 миллионов черных дыр, хотя обнаружить их очень сложно. В центре Млечного Пути находится сверхмассивная черная дыра – Стрелец A*. Колоссальная структура примерно в 4 миллиона раз превышает массу Солнца и находится примерно в 26000 световых лет от Земли, согласно заявлению НАСА. Первой обнаруженной черной дырой стала Лебедь-X1. Ближайшая к Земле черная дыра называется «Единорог» и находится примерно в 1500 световых годах от нас. Прозвище имеет двойное значение. Мало того, что черная дыра находится в созвездии Единорога, ее невероятно низкая масса – примерно в три раза больше массы Солнца – делает ее почти единственной в своем роде [3].

Теорема об отсутствии волос утверждает, что все чёрные дыры описываются решением гравитационных и электромагнитных уравнений Эйнштейна-Максвелла в общей теории относительности и вполне могут характеризоваться только тремя внешне наблюдаемыми классическими параметрами: массой, электрическим зарядом и угловым моментом. Вся другая информация (для которой «волосы» являются метафорой) о материи, которая образовала черную дыру, или поглощается ею, исчезает за горизонтом событий чёрной дыры, следовательно, постоянно недоступна для внешнего наблюдения.

Джон Уилер однажды обронил фразу, что «у чёрных дыр нет волос», от которой и произошло название теоремы. Фраза подразумевает, что две чёрные дыры с одинаковой массой, зарядом и моментом вращения между собой неразличимы, как две лысины. Также Бекенштейн обратил внимание, что при поглощении вещества чёрная дыра становится больше и тяжелее, соблюдая первый закон термодинамики (закон сохранения энергии), а значит, она не должна нарушать и второго закона. Попадая в чёрную дыру, энтропия вещества не обнуляется: она переходит в увеличение площади горизонта. В итоге Бекенштейн вывел так называемый «закон площадей»: энтропия чёрной дыры пропорциональна площади её горизонта событий.

В 1970 г. аспирант Уилера в Принстонском университете Деметриус Христодулу и Стивен Хокинг из Кембриджского университета независимо друг от друга доказали, что при слиянии чёрных дыр общая площадь горизонта событий никогда не уменьшается: площадь горизонта новой чёрной дыры будет больше или равна суммарной площади двух исходных горизонтов, а одна большая чёрная дыра не может распасться на две меньшие.

В 1973 г. Стивен Хокинг провёл аналогию между законами механики чёрных дыр и законами термодинамики. Оказалось, что эти законы практически совпадают. Для чёрной дыры энергия пропорциональна массе, энтропия – площади горизонта событий, а температура – поверхностной гравитации. Первое начало термодинамики (закон сохранения энергии) соответствует формуле массы чёрной дыры, которая пропорциональна радиусу горизонта событий и угловому моменту. Второе начало термодинамики проявляется в том, что энтропия, как и площадь горизонта событий, либо увеличивается, либо остаётся постоянной. Третье начало термодинамики говорит о температуре, при которой энтропия достигает минимума – абсолютный ноль по Кельвину. У чёрной дыры роль температуры играет поверхностная гравитация. Нулевое начало термодинамики (если две системы находятся в тепловом равновесии с третьей, то они находятся в тепловом равновесии друг с другом) для чёрных дыр звучит так: «на горизонте событий стационарной чёрной дыры значение поверхностной гравитации повсюду одинаково».

До сих пор нет строгого математического доказательства теоремы об отсутствии волос. Даже в случае учёта одной гравитации (например, нулевые электрические поля) гипотеза была частично решена в работах Стивена Хокинга, Брэндона Картера и Дэвида Робинсона [4].

В 1974 г. Стивен Хокинг сделал одно из важнейших своих предсказаний: что черные дыры способны полностью испаряться. Согласно гипотезе Хокинга, черные дыры не являются идеально «черными», а способны испускать частицы. Это излучение, считал британский физик, уносит с собой энергию и массу черной дыры, поэтому через определенное время черная дыра исчезает полностью [5].

Стивен Хокинг описал предсказанное им испарение чёрных дыр следующим образом: чёрная дыра поляризует вакуум своей гравитацией. Две виртуальные частицы, рождённые по разные стороны от горизонта событий, уже не смогут аннигилировать. Одна из них падает в чёрную дыру, а вторая становится реальной и улетает в космос в виде излучения Хокинга. Суммарная энергия виртуальных частиц всегда равна нулю. Если улетающая частица получила положительную энергию, значит, у провалившейся под горизонт энергия будет отрицательной. В результате чёрная дыра потеряет массу, эквивалентную энергии излучения Хокинга. Чёрная дыра имеет положительный или отрицательный заряд, она также будет поляризовать вакуум на частицы и античастицы.

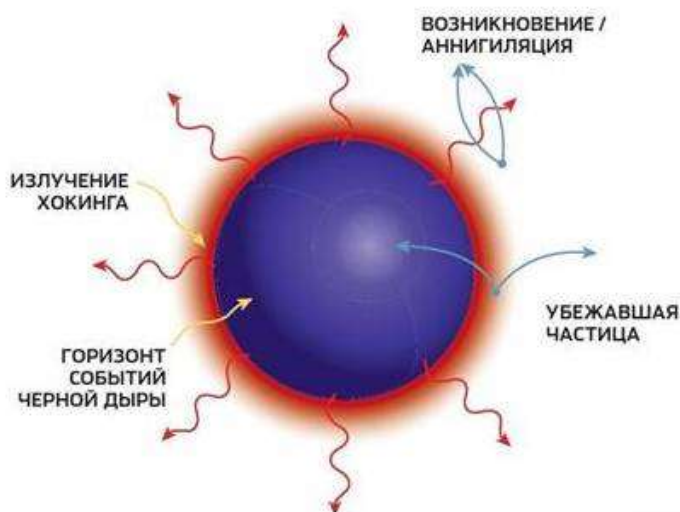


Рисунок 1 – Упрощённое объяснение излучения Хокинга – разрыв горизонтом событий пары виртуальных частиц

Массивные чёрные дыры излучают низкоэнергетичные радиофотоны, теряющиеся в космическом микроволновом фоне. А микроскопические чёрные дыры при испарении могут излучать и тяжёлые частицы высоких энергий, поэтому на финальных стадиях распада они буквально взрываются. Интенсивность излучения Хокинга совпадает с температурой чёрной дыры, предсказанной Бекенштейном, что является убедительным аргументом в пользу термодинамического подхода к описанию чёрных дыр. И главное: расчёты Хокинга показали, что чёрные дыры не вечны – они испаряются [6].

Температура чёрной дыры обратно пропорциональна её массе, а время полного испарения чёрной дыры пропорционально кубу её массы. Если нормальные физические объекты от потери энергии охлаждаются, то чёрные дыры наоборот – нагреваются. Чем меньше чёрная дыра, тем сильнее у неё поверхностная гравитация и тем больше она излучает энергии. Температура чёрной дыры планковских размеров составляет порядка 10^{32} градусов, а время жизни – доли секунды, этим она похожа на массивную элементарную частицу, которая называется максимон. Такую чёрную дыру можно получить искусственным путём, если сконцентрировать в одной точке энергию, эквивалентную планковской массе. Но, чтобы придать частице столько энергии (порядка 10^{26} Эв), понадобится ускоритель длиной несколько миллионов световых лет. Чёрные дыры побольше испаряются уже не так быстро. За время существования нашей Вселенной – порядка 10^{10} лет – могли испариться только первичные чёрные дыры массой до 10^{12} кг.

Температура чёрной дыры массой 10^{14} кг – примерно как у горы Эверест – оказывается ниже температуры космического фонового излучения (2,7 K), а значит, она будет поглощать больше энергии, чем испускать. Типичные чёрные дыры звёздной массы имеют температуру меньше миллионной доли кельвина. Они начнут испаряться когда температура реликтового излучения упадёт почти до нуля вследствие расширения Вселенной. Общая продолжительность их жизни составит порядка 10^{66} лет. В конце любую чёрную дыру ожидает эффектный взрыв, который рассеет остатки поглощённого ею вещества. За последнюю секунду чёрная дыра излучает $2,05 \cdot 10^{22}$ Дж энергии, что равно 5 млн мегатонн в тротиловом эквиваленте [7].

Стивен Хокинг так и не получил Нобелевскую премию за своё открытие, потому что испарение чёрных дыр практически невозможно подтвердить экспериментальным путём. Длина волны излучения Хокинга соответствует диаметру чёрной дыры, а частота настолько низкая, что ни один телескоп не способен его обнаружить на фоне реликтового излучения. Кроме фотонов, чёрная дыра также может излучать электроны, позитроны, нейтрино и другие частицы, но это происходит лишь на финальной стадии испарения.

Чёрные дыры представляют собой уникальные и необычные объекты с непривычными свойствами. Несмотря на значительный прогресс в их изучении, природа пространства и времени в окрестности чёрных дыр остаётся загадкой. Некоторые аспекты этой проблемы до сих пор кажутся необычными научными явлениями, интересными лишь для специалистов.

Список использованных источников:

1. И.Новиков . Черные дыры и Вселенная. М., "Молодая гвардия", 1985 г.
2. Белые карлики и нейтронные звезды (научная статья)
<https://djuu.online/file/5uWKfaSI2YTH3?ysclid=m8hm8jv231361375555>.
3. Черные дыры: все, что вам нужно знать 18 июля 2023. <https://dzen.ru/a/ZLZ6IB-xpEwV1vEM?ysclid=m8htuoqrzc961741819>.
4. Научно-популярное издание «Космос. Большая энциклопедия». – ЭКСМО 2018 г.
5. Хокинг был прав: Черные дыры испаряются, показывает новый эксперимент
https://pikabu.ru/story/khoking_byil_prav_chernye_dyryi_isplayayutsya_pokazyivaet_novyy_yeksperiment_6758155?ysclid=m8h8ik0ew5650560295.
6. Термодинамика чёрных дыр. Энтропия Бекенштейна-Хокинга, комплементарность Сасскинда и дуальность Малдасены <https://habr.com/ru/articles/861512/>.

BLACK HOLES: THERMODYNAMICS, HAWKING RADIATION

Lyashko M.S.¹, Levonenko Y.I.¹

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Doroshevich I.L. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Annotation. This paper discusses the topic of black holes, as well as the path of their formation. The thermodynamic properties of black holes are highlighted, including the no-hair theorem, the laws of black hole mechanics, and Hawking radiation.

Keywords. Black hole, event horizon, gravitational radius, Hawking radiation, no hair theorem, thermodynamics of black holes, entropy, cosmological processes.