

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

РЕФЕРАТ

на тему:

Чёрные дыры

Работу выполнил

студент 2 курса

очного отделения

Михеев Семён Алексеевич

26.11.2017

Москва-2017

Содержание

Введение.....	3
Что такое черная дыра?.....	4
История	4
Образование черных дыр.....	6
Теорема об отсутствии волос.....	9
Излучение Хоккинга.....	10
Поиск черных дыр.....	11
Заключение.....	13
Список литературы.....	1

Введение

Чёрные дыры являются одной из главных загадок нашей вселенной. Несмотря на то, что исследование этого феномена началось более ста лет назад, он до сих пор остаётся одним из самых неизученных. Безусловно, эта область также является одной из самых перспективных и одной из самых популярных. В наше время сложно найти человека, который никогда не слышал о черных дырах, однако далеко не все в полной мере представляют суть этого явления. Что же такое чёрные дыры? Как они образуются? Какими свойствами обладают? В своей работе я постараюсь вкратце осветить данные вопросы.

Что такое черная дыра?

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 (скорость убегания) 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» $r_g = 2GM/c^2$. 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 $r_g \gg 3$ км. А для Земли (M = $6 \cdot 10^{24}$ кг) значение $r_g \gg 1$ см. По этой причине создать и исследовать черную дыру в лаборатории практически невозможно: чтобы тело любой разумной массы (даже в миллионы тонн) стало черной дырой, его нужно сжать до размера, меньшего, чем размер протона или нейтрона, поэтому свойства черных дыр пока изучаются только теоретически.

История

Концепция массивного тела, гравитационное притяжение которого настолько велико, что скорость, необходимая для преодоления этого притяжения (вторая космическая скорость), равна или превышает скорость света, впервые была высказана в 1784 году Джоном Мичеллом в письме, которое он послал в Королевское общество. Письмо содержало расчёт, из

которого следовало, что для тела с радиусом в 500 солнечных радиусов и с плотностью Солнца вторая космическая скорость на его поверхности будет равна скорости света. Таким образом, свет не сможет покинуть это тело, и оно будет невидимым. Мичелл предположил, что в космосе может существовать множество таких недоступных наблюдению объектов. В 1796 году Лаплас включил обсуждение этой идеи в свой труд «Exposition du Systeme du Monde», однако в последующих изданиях этот раздел был опущен.

Во второй раз ученые «столкнулись» с черными дырами в 1916, когда немецкий астроном Карл Шварцшильд получил первое точное решение уравнений только что созданной тогда Альбертом Эйнштейном релятивистской теории гравитации – общей теории относительности (ОТО). Оказалось, что пустое пространство вокруг массивной точки обладает особенностью на расстоянии r_g от нее; именно поэтому величину r_g часто называют «шварцшильдовским радиусом», а соответствующую поверхность (горизонт событий) – шварцшильдовской поверхностью. В следующие полвека усилиями теоретиков были выяснены многие удивительные особенности решения Шварцшильда, но как реальный объект исследования черные дыры еще не рассматривались.

В 1930-е годы молодой индийский астрофизик Чандрасекар доказал, что истратившая ядерное топливо звезда сбрасывает оболочку и превращается в медленно остывающий белый карлик лишь в том случае, если ее масса меньше 1,4 масс Солнца. Вскоре американец Фриц Цвикки догадался, что при взрывах сверхновых возникают чрезвычайно плотные тела из нейтронной материи; позднее к этому же выводу пришел и Лев Ландау. После работ Чандрасекара было очевидно, что подобную эволюцию могут претерпеть только звезды с массой больше 1,4 масс Солнца. Поэтому

возник естественный вопрос — существует ли верхний предел массы для сверхновых, которые оставляют после себя нейтронные звезды?

В конце 30-х годов будущий отец американской атомной бомбы Роберт Оппенгеймер установил, что такой предел действительно имеется и не превышает нескольких солнечных масс. Дать более точную оценку тогда не было возможности; теперь известно, что массы нейтронных звезд обязаны находиться в интервале $1,5-3 M_{\odot}$. Но даже из приблизительных вычислений Оппенгеймера и его аспиранта Джорджа Волкова следовало, что самые массивные потомки сверхновых не становятся нейтронными звездами, а переходят в какое-то другое состояние. В 1939 году Оппенгеймер и Хартланд Снайдер на идеализированной модели доказали, что массивная коллапсирующая звезда стягивается к своему гравитационному радиусу. Из их формул фактически следует, что звезда на этом не останавливается, однако соавторы воздержались от столь радикального вывода.

Окончательный ответ был найден во второй половине XX века усилиями целой плеяды блестящих физиков-теоретиков, в том числе и советских. Оказалось, что подобный коллапс всегда сжимает звезду «до упора», полностью разрушая ее вещество. В результате возникает сингулярность, «суперконцентрат» гравитационного поля, замкнутый в бесконечно малом объеме. У неподвижной дыры это точка, у вращающейся — кольцо. Кривизна пространства-времени и, следовательно, сила тяготения вблизи сингулярности стремятся к бесконечности. В конце 1967 года американский физик Джон Арчибальд Уилер первым назвал такой финал звездного коллапса черной дырой.

Образование черных дыр

Самый 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). Выделяющееся при этом тепло компенсирует потерю энергии, уходящей от звезды с ее излучением и звездным ветром. Термоядерные реакции поддерживают высокое давление в недрах звезды, препятствуя ее сжатию под действием собственной гравитации. Однако со временем ядерное топливо истощается и звезда начинает сжиматься.

Наиболее быстро сжимается ядро звезды, при этом оно сильно разогревается (его гравитационная энергия переходит в тепло) и нагревает окружающую его оболочку. В итоге звезда теряет свои наружные слои в виде медленно расширяющейся планетарной туманности или катастрофически сброшенной оболочки сверхновой. А судьба сжимающегося ядра зависит от его массы. Расчеты показывают, что если масса ядра звезды не превосходит трех масс Солнца, то она «выигрывает битву с гравитацией»: 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 уже ничто не сможет остановить его катастрофический коллапс, и 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.

Астрономические наблюдения хорошо согласуются с этими расчетами: все компоненты двойных звездных систем, проявляющие свойства черных дыр (в 2005 их известно около 20), имеют массы от 4 до 16 масс Солнца. Теория звездной эволюции указывает, что за 12 млрд. лет существования нашей Галактики, содержащей порядка 100 млрд. звезд, в результате коллапса наиболее массивных из них должно было образоваться несколько

десятков миллионов черных дыр. К тому же, черные дыры очень большой массы (от миллионов до миллиардов масс Солнца) могут находиться в ядрах крупных галактик, в том числе, и нашей. Об этом свидетельствуют астрономические наблюдения, хотя пути формирования этих гигантских черных дыр не вполне ясны.

Если в нашу эпоху высокая плотность вещества, необходимая для рождения черной дыры, может возникнуть лишь в сжимающихся ядрах массивных звезд, то в далеком прошлом, сразу после Большого взрыва, с которого около 14 млрд. лет назад началось расширение Вселенной, высокая плотность материи была повсюду. Поэтому небольшие флуктуации плотности в ту эпоху могли приводить к рождению черных дыр любой массы, в том числе и малой. Но самые маленькие из них в силу квантовых эффектов должны были испариться, потеряв свою массу в виде излучения и потоков частиц. «Первичные черные дыры» с массой более 10^{12} кг могли сохраниться до наших дней. Самые мелкие из них, массой 10^{12} кг (как у небольшого астероида), должны иметь размер порядка 10^{-15} м (как у протона или нейтрона).

Наконец, существует гипотетическая возможность рождения микроскопических черных дыр при взаимных соударениях быстрых элементарных частиц. Таков один из прогнозов теории струн – одной из конкурирующих сейчас физических теорий строения материи. Теория струн предсказывает, что пространство имеет более трех измерений. Гравитация, в отличие от прочих сил, должна распространяться по всем этим измерениям и поэтому существенно усиливаться на коротких расстояниях. При мощном столкновении двух частиц (например, протонов) они могут сжаться достаточно сильно, чтобы родилась микроскопическая черная дыра. После этого она почти мгновенно разрушится («испарится»), но наблюдение за этим процессом представляет для физики большой интерес, поскольку, испаряясь,

дыра будет испускать все существующие в природе виды частиц. Если гипотеза теории струн верна, то рождение таких черных дыр может происходить при столкновениях энергичных частиц космических лучей с атомами земной атмосферы, а также в наиболее мощных ускорителях элементарных частиц.

Теорема об отсутствии волос

Теорема об отсутствии волос утверждает, что все чёрные дыры описываются решением гравитационных и электромагнитных уравнений Эйнштейна-Максвелла в ОТО 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.

До сих пор нет строгого математического доказательства теоремы об отсутствии волос, и математики называют её гипотезой об отсутствии волос. Даже в случае учёта одной гравитации (например, нулевые электрические поля) гипотеза была только частично решена в работах Стивена Хокинга, Брэндона Картера и Дэвида Робинсона, при дополнительной гипотезе о невырожденном горизонте событий и техническом, ограничительном и трудно обосновываемом предположении о действительной аналитичности пространственно-временного континуума.

Излучение Хоккинга

Пусть гравитация черной дыры описывается (классической) общей теорией относительности, тогда как окружающий вакуум - квантовой теорией поля. Квантовое испарение аналогично процессу рождения пар в сильном магнитном поле за счет поляризации вакуума. В море Ферми пар частиц-античастиц, постоянно рождающихся и аннигилирующих, возможны четыре процесса, схематически изображенных на рисунке .

Некоторые пары частиц, родившись из квантовых флуктуаций, просто аннигилируют вне горизонта (процесс I). Другие, возникшие слишком близко к нему, безвозвратно исчезают в черной дыре (процесс IV). Другие же

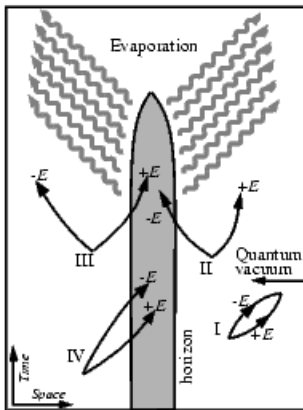


Figure 12

разделяются - одна из частиц захватывается черной дырой, в то время как другая улетает прочь (процессы II и III). Расчеты показывают, что преимущественно реализуется процесс II, так как (классический) гравитационный потенциал поляризует квантовый вакуум. Как следствие, черная дыра излучает частицы с тепловым спектром, причем характеристическая

температура точно описывается формулой, следующей из термодинамической аналогии:

$$T = \hbar \frac{g}{2\pi} = 10^{-7} \frac{M_{\odot}}{M} \text{K},$$

где \hbar - постоянная Планка. Легко видеть, что температура пренебрежимо мала для любой астрофизической черной дыры с массой порядка солнечной. Однако для "миниатюрных" черных дыр с массами 10^{15} грамм (типичная величина для астероида) хокинговская температура становится порядка 10^{12} К. Время "испарения" черной дыры за счет излучения примерно определяется выражением

$$t_E \approx 10^{10} \text{ years} \left(\frac{M}{10^{15} \text{ grams}} \right)^3$$

Соответственно, черные дыры с массой, меньшей типичной массы астероида (и размером меньше 10^{-13} см) испаряются на временах, меньших время жизни вселенной. Некоторые из них должны испаряться прямо сейчас, давая огромные всплески жесткого излучения. Но ничего подобного до сих пор не наблюдалось (гамма-всплески объясняются совершенно по-другому). Такое наблюдательное ограничение дает верхний предел на плотность мини-черных дыр $100/(\text{св. год})^3$.

Поиски чёрных дыр

Проще всего обнаружить черную дыру по ее гравитационному взаимодействию с окружающим веществом, например, с близкими звездами. Попытки обнаружить невидимые массивные спутники в двойных звездах не увенчались успехом. Но после запуска на орбиту рентгеновских телескопов выяснилось, что черные дыры активно проявляют себя в тесных двойных системах, где они отбирают вещество у соседней звезды и поглощают его, нагревая при этом до температуры в миллионы градусов и делая его на короткое время источником рентгеновского излучения.

Поскольку в двойной системе черная дыра в паре с нормальной звездой обращается вокруг общего центра массы, используя эффект Доплера, удастся измерить скорость звезды и определить массу ее невидимого компаньона. Астрономы выявили уже несколько десятков двойных систем, где масса невидимого компаньона превосходит 3 массы Солнца и заметны характерные проявления активности вещества, движущегося вокруг компактного объекта, например, очень быстрые колебания яркости потоков горячего газа, стремительно вращающегося вокруг невидимого тела.

Особенно перспективной считают рентгеновскую двойную звезду V404 Лебедя, масса невидимого компонента которой оценивается не менее, чем в 6 масс Солнца. Другие кандидаты в черные дыры находятся в двойных системах Лебедь X-1, LMC X-3, V616 Единорога, QZ Лисички, а также в рентгеновских новых Змееносец 1977, Муха 1981 и Скорпион 1994. Почти все они расположены в пределах нашей Галактики, а система LMC X-3 – в близкой к нам галактике Большое Магелланово Облако.

Другим направлением поиска черных дыр служит изучение ядер галактик. В них скапливаются и уплотняются огромные массы вещества, сталкиваются и сливаются звезды, поэтому там могут формироваться сверхмассивные черные дыры, превосходящие по массе Солнце в миллионы раз. Они притягивают к себе окружающие звезды, создавая в центре галактики пик яркости. Они разрушают близко подлетающие к ним звезды, вещество которых образует вокруг черной дыры аккреционный диск и частично выбрасывается вдоль оси диска в виде быстрых струй и потоков частиц. Это не умозрительная теория, а процессы, реально наблюдаемые в ядрах некоторых галактик и указывающие на присутствие в них черных дыр с массами до нескольких миллиардов масс Солнца. В последнее время получены весьма убедительные доказательства того, что и в центре нашей Галактики есть черная дыра с массой около 2,5 млн масс Солнца.

Заключение

Итак, чёрные дыры действительно являются весьма интересным и загадочным явлением. В данной области по-прежнему остаётся множество вопросов, ответы на которые пока не получены: что остаётся после завершения процесса квантового распада чёрной дыры, каково доказательство в общем случае «теоремы об отсутствии волос» у чёрной дыры? Также, многие интересные вопросы, такие как вращение и термодинамика чёрных дыр и существование белых дыр не были рассмотрены в данной работе. Я считаю, что исследования в физике чёрных дыр в будущем могут перевернуть наш взгляд на физику и устройство мира.

Список литературы

- И. Д. Новиков, В. П. Фролов. Физика чёрных дыр, 1986
- Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. — Москва: Мир, 1977. -Т. 3. - С. 84-85. - 510 с.
- А. Левин История чёрных дыр // Популярная механика. ООО «Фэшн Пресс», 2005. - № 11.
- Жан-Пьер Люмине. Чёрные дыры: Популярное введение (Перевод Карпова С.)
- Владимир Сурдин. Чёрная дыра. Энциклопедия Кругосвет.
- К. Злосчастьев. Чёрные дыры// Наука и жизнь, 2005 - №12