

## О возможности существования черных дыр в рамках динамичной и стационарной Вселенной

*М.Ю. Докукин, Д.С. Индык*

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

**Аннотация:** Представление о существовании черных дыр лежит в основе множества теорий, описывающих эволюцию галактик и звезд. Несмотря на то, что само их существование у большинства ученых не вызывает сомнений, формально эти объекты считаются гипотетическими. Многие астрофизики считают, что наша Вселенная возникла из сингулярности, которая начала расширяться с момента Большого взрыва, однако, если черных дыр не существует, то им, очевидно, придется переосмыслить свои идеи. В этой статье будет рассмотрен отличный от гипотезы Большого взрыва взгляд на строение Вселенной и на возможность существования чёрных дыр.

**Ключевые слова:** космологическая модель, Большой взрыв, конечная Вселенная, астрофизика, чёрная дыра, сверхмассивные чёрные дыры, методы поиска чёрных дыр, гравитационные силы.

### Введение

Для начала опишем модель Вселенной, о которой пойдёт речь. Модель Вселенной – это совокупность представлений о пространственной структуре Вселенной и движении её составных элементов, дополненная математическими уравнениями, описывающими это движение.

Прежде чем освещать гипотезы, надо учесть следующие очень важные наблюдательные факты [1]:

- 1) все галактики удаляются от нас и друг от друга и тем быстрее, чем больше расстояние между ними (закон Хаббла);
- 2) векторы скоростей галактик, если их экстраполировать назад во времени, сходятся в одну точку.

Эти факты сыграли решающую роль в формировании парадигмы расширяющейся Вселенной и позднее – гипотезы Большого взрыва (ГБВ). Однако разбегание галактик можно объяснить иначе, чем это делается в ГБВ.

Гипотеза 1 «о движении галактик».

Каждая галактика или группа гравитационно связанных галактик движется по замкнутой орбите, представляющей собой сильно вытянутый квазиэллипс, в одном из фокусов которого находится ядро – гравитационный центр Вселенной (рис. 1).

Однако, если все галактики движутся по вытянутым замкнутым орбитам, то кроме галактик, движущихся как и наша галактика к ядру, у которых спектры излучения имеют «красное смещение», мы должны наблюдать множество галактик, которые движутся от ядра навстречу нашей

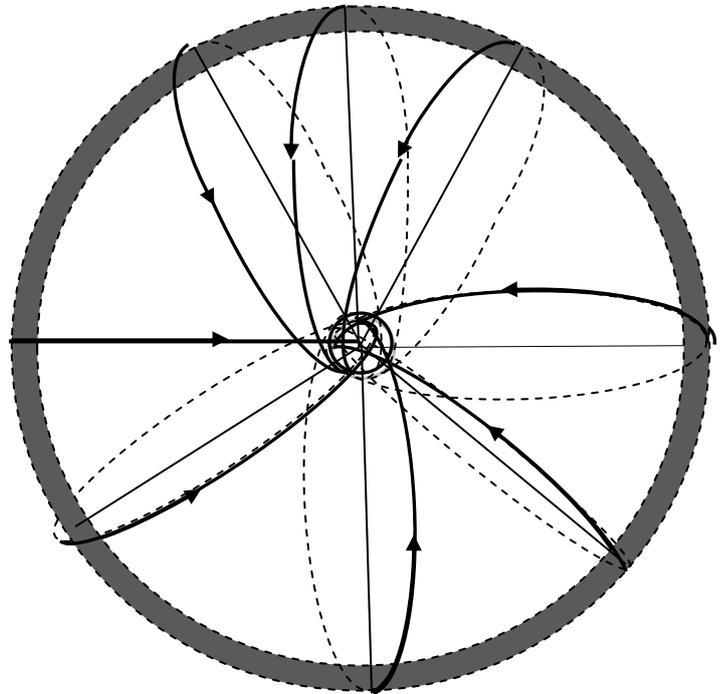


Рис. 1. Схема движения галактик.

галактике, и поэтому их спектры излучения должны иметь «фиолетовое смещение». Галактик с фиолетовым смещением спектра мы не наблюдаем. Остается предположить, что на участках орбит, где галактики удаляются от ядра, их вещество находится в таком состоянии (например, разрушено до уровня корпускул), которое оптически невидимо.

Таким образом, галактики, которые находятся к ядру ближе, успели пройти больший путь и набрать большую скорость – поэтому они непрерывно удаляются от галактик, начавших свое движение к ядру позднее. Кроме того, так как орбиты галактик сильно вытянуты и ядро находится на удалении в миллиарды световых лет, векторы скоростей галактик исходят из одной точки, то есть скорее устремлены к общей «точке».

## Гипотеза 2.

Вселенная ограничена в пространстве; скорость распространения любого сигнала конечна и не превышает скорости света. Будем называть минимальное расстояние галактики от ядра *периядром*, а максимальное – *апоядром*. В точке периядра галактика движется с максимальной скоростью (судя по измеренным значениям «красных смещений» самых далёких от нас галактик, эта скорость больше  $0,5c$ ).

Продолжим анализ движения галактик. Орбиты галактик лежат в произвольных плоскостях, но все плоскости проходят через центр ядра. Таким образом, Вселенная похожа на шар, который заполнен галактиками, которые большую часть времени движутся к ядру или от ядра, то есть радиально.

С учетом принятых положений каждая галактика движется около ядра Вселенной по квазиэллиптической орбите, при этом в ближайшей к ядру точке орбиты скорость галактики принимает максимальное значение, близкое к скорости света  $c$ .

На самом деле, эта формулировка напоминает закон Кеплера о движении планет: «Планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которого находится Солнце» [2].

Надо отметить, что еще И. Ньютон указал на то, что форма орбиты определяется скоростью тела в точке траектории, ближайшей к центру силы и может иметь форму (рис. 2):

- окружности, если скорость тела равна круговой скорости  $v_{кр}$ , при которой тело вращается по окружности вокруг центра силы;
  - эллипса, если значение скорости попало в интервал от круговой скорости до параболической скорости  $v_n$  – скорости «убегания» тела от центра силы по параболической траектории;
  - параболы, если скорость равна  $v_n = \sqrt{2} v_{кр}$ ;
  - гиперболы, если скорость больше  $v_n$ .
-

Сформулируем задачу: рассчитать параметры траектории галактики, а по ним – параметры Вселенной (размер, массу, период обращения галактики по орбите и др.).

Описать движение системы можно с помощью уравнений Общей теории относительности (ОТО).

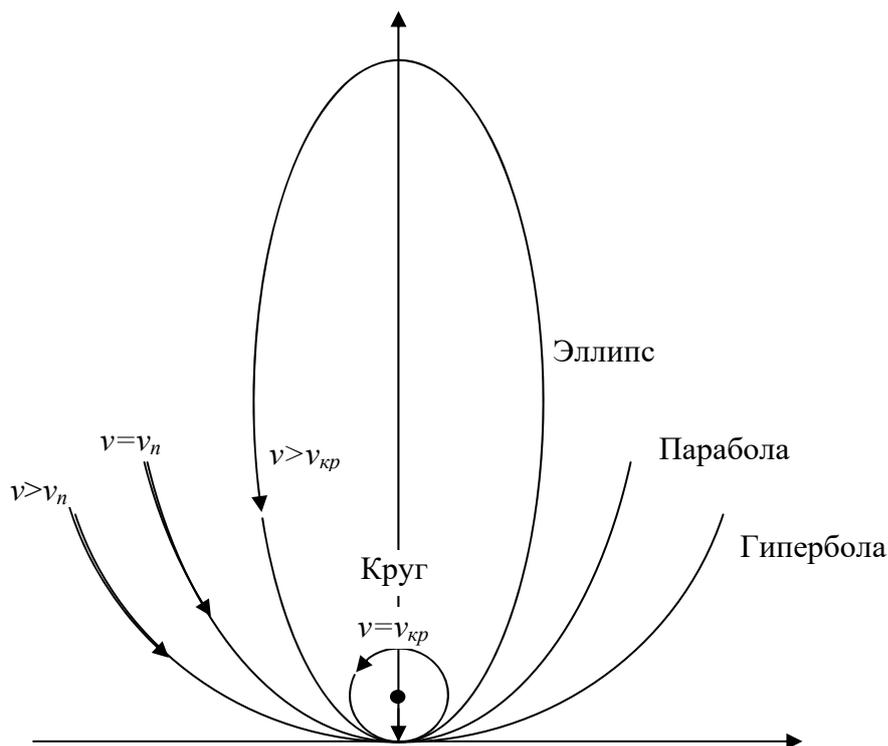


Рис. 2. Возможные траектории тела в зависимости от скорости.

Так как на некотором участке траектории галактики движутся с околосветовыми скоростями, (а это означает, что неограниченный рост кинетической энергии тела сопровождается неограниченным ростом его массы) анализируя движение галактики во Вселенной, надо при вычислении силы тяготения, действующей на галактику, использовать гравитационную массу, а при вычислении ускорения – релятивистскую массу [3]:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

где  $m_0$  – масса покоя.

Согласно гипотезам о движении галактик, мы можем перейти к гипотетической круговой орбите радиуса  $R$ , по которой галактика движется с круговой скоростью:

$$v_{кр} = \frac{v_n}{\sqrt{2}} \approx \frac{c}{\sqrt{2}}.$$

Условием устойчивости этого движения является равенство центробежной и центростремительных сил, действующих на неё:

$$F_{цб} = F_{цс}.$$

Здесь центростремительной силой является сила гравитации:

$$F_{сп} = G \frac{m_{сп} M_{я}}{R^2},$$

где  $m_{сп} = m_0$  – масса покоя галактики,  $M_{я}$  – масса ядра,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$  – гравитационная постоянная.

Центробежная сила представляется в виде:

$$F_{цб} = \frac{m_{ин} v_{кр}^2}{R},$$

где  $m_{ин} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = m_0 \sqrt{2}$  – инерционная масса,  $v_{кр} = \frac{c}{\sqrt{2}}$ ,  $\beta = \frac{v_{кр}}{c} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ .

Подставляя эти выражения, получаем уравнение для сил:

$$G \frac{m_0 M_{я}}{R^2} = \frac{m_0 c^2 \sqrt{2}}{2R} \quad \text{или} \quad G \frac{M_{я}}{R} = \frac{c^2}{\sqrt{2}}.$$

Теперь можем уверенно встать на путь нахождения некоторых числовых характеристик Вселенной, например, радиуса круговой орбиты движения галактик, радиуса ядра Вселенной и его массы [2].

Начинать следует с выбора галактики, которой предстоит вращаться в рамках динамичной и стационарной атмосферы Вселенной. Более 60% галактик в нашем окружении – спиральные. В том числе и наша галактика Млечный путь. Поэтому рассмотрим движение крупной спиральной галактики вокруг ядра. В крайней точке траектории, близкой к ядру (точка  $B$  на рис. 3), имеет место равенство:  $F_{цб} = F_{зр}$ .

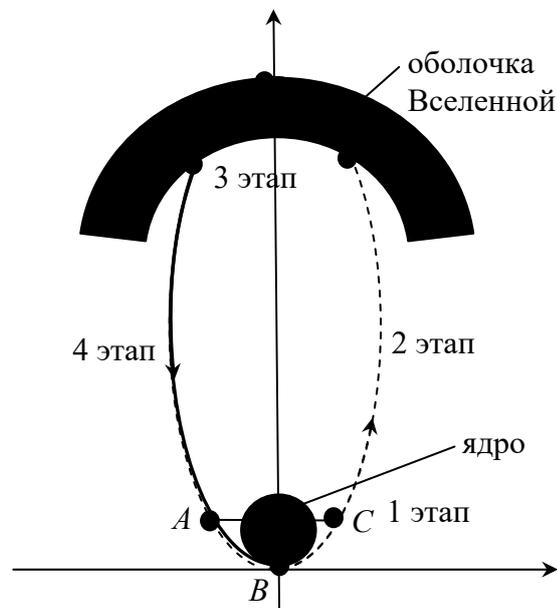


Рис. 3. Этапы движения галактики.

Так как галактика велика, указанное равновесие в ней нарушается, и она начинает деформироваться, вытягиваясь в направлении поперёк движению, при этом её структурные элементы подвергаются разрушению.

Однако галактика продолжает ускоряться, при приближении к ядру, то есть её инертная масса увеличивается и сокращается её продольный размер, то есть галактика принимает вид эллипсоида, большая ось которого ориентирована по линии, соединяющий центр масс галактики с центром ядра. Уместен вопрос: полученный галактикой при обходе ядра импульс вращательного движения в дальнейшем сохраняется? Видимо, да, если только галактика не переживает какую-нибудь катастрофу! Катастрофа, например, столкновение с другой галактикой, может вызвать существенные изменения ее массы или формы. Таким образом, проходя траекторию вокруг

ядра, галактики совершают вращательное движение, что и наблюдают астрономы.

При выходе на восходящую ветвь орбиты, спиралевидная форма галактики постепенно восстанавливается. Будем считать, что задача оценки времени, за которое галактика совершает поворот вблизи ядра, сводится к определению начального периода вращения крупной спиральной галактики.

Данные о скоростях вращения вещества вблизи центров галактик, как правило, отсутствуют. При малых расстояниях от центра ( $r$ ) зависимости скоростей известны только для двух спиральных галактик: нашего Млечного пути и ближайшей М31. Например, для галактики М31 на расстоянии  $r = 6$  кпк и при окружной скорости, взятой из интервала 220–250 км/с, угловая скорость вращения равна [2]:

$$\Omega = \frac{v_{ep}(r)}{r} = \frac{240 \text{ км/с}}{6 \text{ кпк}} = 12,9 \cdot 10^{-16} \text{ с}^{-1}.$$

Тогда период обращения составит:

$$T = \frac{2\pi}{\Omega} = \frac{6,28 \text{ рад}}{12,9 \cdot 10^{-16} \text{ рад/с}} = 4,87 \cdot 10^{15} \text{ с} \approx 154 \cdot 10^6 \text{ лет}.$$

Так же необходимо определить время, за которое галактика обогнёт ядро. Из рисунка видно, что ось бара галактики при огибании поворачивается на  $\gamma = \pi$  рад. Зная период обращения галактики (бара) вокруг собственной оси, находим время  $t$ :

$$t = \frac{T}{2\pi} \gamma = \frac{T}{2} = 154 \cdot 10^6 / 2 = 77 \cdot 10^6 \text{ лет}$$

Теперь можно оценить радиус ядра:

$$R = \frac{c \cdot t}{4,6} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 77 \cdot 10^6 \text{ лет}}{4,6} \approx 15,8 \cdot 10^{22} \text{ м}.$$

Теперь, когда стала известна величина  $R$ , можно определить массу ядра:

$$M_{\text{я}} = \frac{c^2}{G\sqrt{2}} R = \frac{(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 \cdot 15,8 \cdot 10^{22} \text{ м}}{1,41 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)} \approx 1,52 \cdot 10^{50} \text{ кг}.$$

Это простое соотношение отображает важнейшие взаимосвязи этого мира – оно показывает, что

$$\frac{M_{\text{я}}}{R} = \frac{c^2}{G\sqrt{2}}.$$

### К вопросу о существовании черных дыр

Что есть чёрная дыра? Чёрная дыра – особый космический объект, занимающий относительно малую область пространства-времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что покинуть её не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света, в том числе фотоны [4].

По сути, черной дырой может стать всё что угодно, если его сжать до некоторого радиуса, называемого радиусом Шварцшильда:

$$R \leq \frac{2G \cdot M}{c^2}.$$

Известный факт – чтобы наша Земля превратилась в черную дыру нужно сжать её до среднего размера арахиса.

Началось всё с того, что в 1784 году английский учёный Митчелл обратил внимание на то, что, если, не изменяя массу  $M$  (например планеты, которая движется в гравитационном поле Солнца), уменьшить расстояние  $R$  (до Солнца), постепенно сжимая тело, то рано или поздно наступит момент, когда скорость тела станет больше скорости света, которая в то время уже была приближённо найдена. В этом случае тело, если это звезда, перестает излучать свет, то есть становится невидимым [2].

И только в 1968 году появился термин «чёрная дыра», после публикации Эйнштейном работы касательно ОТО и представления

Шварцшильдом общего уравнения для гравитационного поля изолированного тела большой массы, а точнее для параболической скорости:

$$v = \sqrt{\frac{2G \cdot M}{R}}.$$

Радиус Шварцшильда находится после подстановки в эту формулу скорости света, то есть, рассматривая тот случай, когда тело становится невидимым (чёрной дырой).

Существует три основных вида черных дыр [2]:

- черные дыры звёздной массы – образованы в результате коллапса массивных звезд;
- сверхмассивные черные дыры – находятся, предположительно, в ядрах многих галактик;
- чёрные мини-дыры (размером в  $\sim 10^{-7}$  мм и массой  $10^6$ – $10^9$  тонн (их существование под большим вопросом, поэтому рассматривать мы будем первые два вида черных дыр).

Локальность и компактность чёрных дыр позволяет при построении их теории пренебречь космологической постоянной, так как её влияние при таких характерных размерах задачи пренебрежимо мало. В этих условиях в рамках ОТО стационарные решения для чёрных дыр описываются только тремя параметрами: массой ( $M$ ), моментом импульса ( $L$ ) и электрическим зарядом ( $Q$ ) [5].

Следует отметить, что в отсутствие внешних воздействий любая чёрная дыра стремится стать стационарной. Это было доказано усилиями многих физиков-теоретиков, из которых особо следует отметить работу «Математическая теория чёрных дыр» нобелевского лауреата Субраманьяна Чандрасекара.

В табл. 1 представлены решения уравнений Эйнштейна для чёрных дыр соответствующими характеристиками.

Таблица № 1

Возможные решения уравнений ОТО для различных черных дыр

Характеристика ЧД	Без вращения	Вращается
Без заряда	<u>Решение Шварцшильда</u>	<u>Решение Керра</u>
Заряженная	<u>Решение Рейснера — Нордстрёма</u>	<u>Решение Керра — Ньюмена</u>

Вывод решения уравнений Эйнштейна без космологического члена для пустого пространства в сферически симметричном статическом случае был представлен К. Шварцшильдом в 1915 году [6] (позднее Биркхоф показал, что предположение статичности было излишне). Решение существовало в пространстве-времени  $M$  с топологией  $R^2 \times S^2$  и интервалом, приводимым к виду:

$$ds^2 = -(1 - r_s / r) c^2 dt^2 + (1 - r_s / r)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2),$$

где  $t$  – временная координата, [с],  $r$  – радиальная координата, [м],  $\theta$  – полярная угловая координата, [рад],  $\phi$  – азимутальная угловая координата, [рад],  $r_s$  – радиус Шварцшильда тела с массой  $M$ , [м].

Временная координата соответствует времениподобному вектору Киллинга  $\partial_t$ , который отвечает за статичность пространства-времени, при этом её масштаб выбран так, что  $t$  – это время, измеряемое бесконечно удалёнными покоящимися часами. Угловые координаты  $\theta$  и  $\phi$  отвечают сферической симметрии задачи и связаны с соответствующими векторами  $\partial_t$  Киллинга.

Из основных положений ОТО следует, что такую метрику создаст снаружи от себя любое сферически симметричное тело с радиусом  $r > r_s$  и массой  $M = \frac{c^2 r_s}{2G}$ .

**Решение Рейснера – Нордстрёма.** Это статичное решение (без временной координаты) уравнений Эйнштейна для сферически-симметричной чёрной дыры с зарядом, но без вращения.

Метрика чёрной дыры Рейснера — Нордстрёма отвечает интервалу [7]:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_s}{r} + \frac{r_Q^2}{r^2}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{r_s}{r} + \frac{r_Q^2}{r^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2),$$

где  $r$  – радиальная координата (длина «экватора» изометрической сферы [2], делённая на  $2\pi$ ), [м],  $r_Q$  – масштаб длины, соответствующий электрическому заряду  $Q$  (аналог радиуса Шварцшильда, только не для массы, а для заряда), [м] и определяемый как  $r_Q^2 = \frac{Q^2 G}{4\pi\epsilon_0 c^4}$ .

Так как параметры чёрной дыры не могут быть произвольными, то, например, максимальный заряд, который может иметь черная дыра Рейснера – Нордстрёма, равен:

$$Q_{\max} \approx \frac{10^{40} eM}{M_c},$$

где  $e$  – заряд электрона,  $M_c$  – масса Солнца. Это возможно в рамках модели Керра – Ньюмена для черных дыр с нулевым угловым моментом ( $L=0$ , то есть без вращения). Такое решение при экстраполяции за горизонт – аналогично шварцшильдовскому решению – порождает удивительную геометрию пространства-времени, в которой через чёрные дыры соединяется бесконечное число «вселенных», в которые можно попадать, последовательно погружаясь в чёрную дыру.

**Решение Керра – Ньюмена.** Наиболее общим решением, соответствующим конечному состоянию равновесия не возмущаемой внешними полями чёрной дыры является так называемое трёхпараметрическое семейство Керра – Ньюмена [8]. Причем в координатах Бойера – Линдквиста (Boyer – Lindquist) и условиях геометрических единиц  $G = c = 1$  метрика Керра – Ньюмена задаётся выражением:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2Mr - Q^2}{\Sigma}\right) dt^2 - 2(2Mr - Q^2)a \frac{\sin^2 \theta}{\Sigma} dt d\varphi + \left(r^2 + a^2 + \frac{(2Mr - Q^2)a^2 \sin^2 \theta}{\Sigma}\right) \sin^2 \theta d\varphi^2 + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 + \Sigma d\theta^2,$$

где  $\Sigma \equiv r^2 + a^2 \cos^2 \theta$ ;  $\Delta \equiv r^2 - 2Mr + a^2 + Q^2$  и  $a \equiv L/M$  ( $L$  – момент импульса).

Из этой формулы следует, что горизонту событий соответствует радиус  $r_+ = M + \sqrt{M^2 - a^2 - Q^2}$  и, следовательно, параметры чёрной дыры не могут быть произвольными: электрический заряд и угловой момент не могут быть больше значений, соответствующих исчезновению горизонта событий. Для черных дыр Керра – Ньюмена должно выполняться неравенство:  $a^2 + Q^2 \leq M$ .

При нарушении этих ограничений исчезнет горизонт событий, и решение вместо чёрной дыры будет описывать так называемую «голую сингулярность», но такие объекты, согласно распространённым убеждениям, в реальной Вселенной существовать не могут.

Таким образом, радиус горизонта событий для не вращающейся черной дыры равен гравитационному радиусу, а для вращающейся черной дыры – меньше гравитационного радиуса. В последнем случае горизонт событий погружен в эргосферу, содержащую вихревое гравитационное поле, и тело, попавшее в неё, подхватывается вращающимся пространством-временем и

начинает вращаться вокруг центральной черной дыры. Тело, свободно падающее в поле сил гравитации, находится в состоянии невесомости и испытывает действие только приливных сил, которые при падении в чёрную дыру растягивают тело в радиальном направлении, а в тангенциальном – сжимают. Причем величина приливных сил растёт и стремится к бесконечности при  $r \rightarrow 0$  ( $r$  – расстояние до центра дыры).

В некоторый момент собственного времени тело пересечет горизонт событий. С точки зрения наблюдателя, падающего вместе с телом, этот момент ничем не выделен, однако возврата уже не существует. Тело оказывается в горловине (её радиус для точки, где находится тело, и есть  $r$ ), сжимающейся столь быстро, что улететь из неё до момента окончательного схлопывания (в сингулярность) уже не получится, даже двигаясь со скоростью света.

С позиций удалённого наблюдателя падение в чёрную дыру будет восприниматься иначе. Пусть тело будет светиться и посылать сигналы назад с определённой частотой. Вначале удалённый наблюдатель будет видеть, что тело, находясь в процессе свободного падения, постепенно разгоняется под действием сил тяжести по направлению к центру. Цвет тела не изменяется, частота детектируемых сигналов практически постоянна. Но когда тело начнёт приближаться к горизонту событий, фотоны, испускаемые телом, будут испытывать всё большее и большее красное смещение, вызванное двумя причинами: эффектом Доплера и гравитационным замедлением времени (из-за гравитационного поля все физические процессы с точки зрения удалённого наблюдателя будут идти всё медленнее и медленнее, пока вовсе не остановятся).

### **Изучение чёрных дыр и их демографии**

В 1964 году астрофизики Я.Б. Зельдович и Э.Э. Солпитер предсказали мощное энерговыделение от аккрецирующих, то есть притягивающих на себя

---

массу, черных дыр. С тех пор астрономы начали заниматься исследованием этих экзотических объектов.

В статье А.М. Черепашука [9] можно найти подробнейшее описание методологии поиска черных дыр. Сегодняшние исследования во многом обязаны успешному запуску в 2011 году радиointерферометра «Радиоастрон», который позволяет наблюдать ядра галактик, то есть даёт возможность исследовать процессы, происходящие вблизи горизонта событий сверхмассивных черных дыр и даже «увидеть» изображение черной дыры (то есть её тени). Эти данные могут стать главным доказательством существования черных дыр во Вселенной.

Сейчас существует два надежных метода определения масс сверхмассивных черных дыр в центрах галактик: метод разрешенной кинематики и метод эхокартирования.

Первый метод рассчитан на наиболее близкие к нам галактики и подразумевает непосредственное наблюдение за движением объектов (пробных тел) в их центрах. В рамках этого метода рассчитываются скорости пробных тел, их расстояния до центральной черной дыры и делаются выводы о гравитационной силе, а значит и массе сверхмассивной черной дыры.

Методом разрешённой кинематики удалось надёжно измерить массу черной дыры в центре галактики NGC4257:  $M = 3,9 \cdot 10^7 M_c$  [9].

Метод эхокартирования применяется в тех случаях, когда угловое разрешение телескопа уже не позволяет увидеть в центре галактики отдельные пробные тела. В данном методе скорости и расстояния объектов определяются опосредованно. Скорость оценивается по доплеровскому уширению линий излучения, имеющего место в газовых облаках, которые движутся вокруг центральной черной дыры.

Расстояние от газовых облаков до центральной черной дыры определяется по времени запаздывания изменяющихся линий излучения

---

относительно изменчивости непрерывного спектра ядра галактики (континуума), который излучается в центральных частях ядра. Из-за нестационарности процессов в ядре галактики и отдельные линии, и континуум изменяются хаотически, причем между их изменениями наблюдается некоторая зависимость, корреляция: изменения интенсивности повторяют друг друга с некоторым запаздыванием  $\Delta t$  (последнее составляет от недели до нескольких месяцев). Отсюда примерное расстояние до черной дыры оценивается как  $r \cong c\Delta t$ .

С недавнего времени метод эхокартирования получил широкое распространение.

К настоящему времени методами разрешенной кинематики и эхокартирования измерены массы нескольких сотен сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик, которые лежат в пределах  $(10^6 - 10^{10})M_c$ .

### **Чёрные дыры звёздной массы**

Чёрные дыры звёздных масс формируются на конечном этапе жизни звезды [4]. После полного выгорания термоядерного топлива и прекращения соответствующей реакции звезда по теории должна начать остывать, что приведёт к уменьшению внутреннего давления и сжатию звезды под действием гравитации. При этом сжатие может остановиться на определённом этапе, а может перейти в стремительный гравитационный коллапс. В зависимости от массы звезды и вращающего момента возможны ее следующие конечные состояния.

- Погасшая очень плотная звезда, состоящая в основном из гелия, углерода, кислорода, неона, магния, кремния или железа (элементы перечислены в порядке возрастания массы остатка звезды). Такие остатки называют белыми карликами, масса их ограничивается сверху пределом Чандрасекара – около 1,4 солнечных масс.

- Нейтронная звезда, масса которой ограничена пределом Оппенгеймера – Волкова: 2–3 солнечных массы.
- Чёрная дыра.

### Существование черных дыр

#### в рамках динамичной и стационарной Вселенной

В ГБВ движение материи осуществляется от сингулярного к нормальному состоянию вещества. Начальное состояние нам не известно, так как известные законы физики в сингулярности не работают. В процессе образования черной дыры всё диаметрально противоположно – вещество переходит от нормального состояния в сингулярное. Такой процесс объясним физическими закономерностями и начальное состояние известно.

Объекты, размер которых соответствует радиусу Шварцшильда, но которые ещё не являются чёрными дырами, – это нейтронные звёзды[10].

Введем понятие «средней плотности» чёрной дыры, поделив её массу на «объём, заключённый под горизонтом событий»:

$$\rho = \frac{3c^6}{32\pi M^2 G^3}.$$

Существует ограничение на минимальный объём, до которого можно сжать тело массы  $M$ . Так как рассматриваемое тело – шар, его минимально возможный радиус будет равен:

$$R_{\min} = \left( \frac{3M}{4\pi\rho} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Если оба условия выполняются – образовавшийся объект является чёрной дырой.

На основе приведённой выше формулы для радиуса Шварцшильда, получим равенство:

$$\left( \frac{3M}{4\pi\rho} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{2G \cdot M}{c^2},$$

откуда масса черной дыры равна:

$$M_{\min} = c^3 \left( \frac{3}{32\pi G^3 \rho} \right)^{\frac{1}{2}} = \dots \approx 27 \cdot 10^{30} \text{ кг} = 13,5 M_c.$$

Полученная масса не противоречит результатам, полученным по наблюдениям различных моделей черных дыр: 6–14 масс Солнца.

- Черные дыры звёздных масс вполне могут существовать, хоть и их число во Вселенной очень мало.
- Массивные звёзды чаще образуются и гибнут в ядре галактики – там скорее всего и стоило бы искать черные дыры.
- Роль черных дыр звёздной массы в нашей Вселенной довольно мала в силу своей редкости и ограниченности сферы влияния.

### Сверхмассивные черные дыры

Многие считают существование сверхмассивных ЧД более вероятным, чем существование черных дыр звёздной массы. Эти массивные черные дыры  $((1-100) \cdot 10^6$  масс Солнца) располагаются, предположительно, в ядрах галактик. Например, учёные утверждают, что в центре нашей галактики находится черная дыра массой в три миллиона солнечных масс, которая была определена по форме эллиптической орбиты массивной звезды массой в десять солнечных масс, которая якобы обращается вокруг черной дыры. Всё это только предположения.

В 2016 году японские астрофизики сообщили об обнаружении в нашем галактическом центре второй гигантской черной дыры. Наблюдаемый астрономический объект с облаком занимает область пространства диаметром 0,3 светового года, его масса составляет 100 тысяч масс Солнца и находится в 200 световых годах от центра Млечного пути. Пока точно не установлена природа этого объекта – это черная дыра или иной объект.

Есть множество способов для определения массы и ориентировочных размеров сверхмассивного тела, причем большинство из них основано на

измерении характеристик орбит вращающихся вокруг него объектов (звёзд, радиоисточников, газовых дисков) [9]. В простейшем и часто встречающемся случае обращение происходит по кеплеровским орбитам, о чём свидетельствует пропорциональность скорости вращения спутника

квадратному корню из большой полуоси орбиты:  $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ . Здесь масса центрального тела находится по известной формуле  $M = \frac{v^2 r}{G}$ .

О сверхмассивной черной дыре в ядре нашей галактики известно, что ее масса примерно равна  $3 \cdot 10^6$  солнечных масс, а радиус в 20 раз меньше гравитационного радиуса. Этих данных достаточно, чтобы вычислить гравитационный радиус черной дыры:

$$R_{\text{гр}} = M \frac{2G}{c^2} = 3 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ кг} \cdot \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м/кг}^2}{(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2} = 8,89 \cdot 10^9 \text{ м} \approx \\ \approx 0,94 \cdot 10^{-6} \text{ св. лет.}$$

Тогда действительно радиус черной дыры:  $R_{\text{чд}} \approx \frac{R_{\text{гр}}}{20} = 4,445 \cdot 10^8 \text{ м}$ . Это на 10 порядков меньше радиуса ядра галактики, который составляет примерно 500 св. лет. Теперь определим плотность вещества черной дыры:

$$\rho = \frac{M}{V_{\text{чд}}} = \frac{3M}{4\pi R_{\text{чд}}^3} \approx \frac{3 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}}{4 \cdot 3,14 (4,445 \cdot 10^8 \text{ м})^3} = 1,63 \cdot 10^{10} \text{ кг/м}^3.$$

Результат показывает, что плотность черной дыры близка к плотности гелиевых белых карликов –  $10^9 \text{ кг/м}^3$  – сколлапсировавших звёзд малой массы, во множестве рассеянных в галактике. Этот факт может использоваться при определении механизма образования сверхмассивных черных дыр.

➤ Теоретически существование сверхмассивных черных дыр возможно.

- Но они не оказывают заметного влияния на процессы в ядре галактики. Вполне возможно, что в ядре спокойно сосуществует несколько черных дыр.
- Черная дыра ускоряет до околосветовых скоростей частицы, попадающие в её гравитационное поле, при этом они излучают рентгеновские лучи.

### Заключение

В данной работе, руководствуясь решением Шварцшильда, были рассмотрены чёрные дыры звёздной массы и сверхмассивные чёрные дыры; были рассчитаны минимальный радиус и масса чёрной дыры. Результаты показывают, что существование чёрных дыр звёздных масс и сверхмассивных чёрных дыр возможно в рамках стационарной и динамичной Вселенной.

Благодаря прогрессирующим технологиям, запуску радиоинтерферометра «Радиоастрон», активным исследованиям демографии черных дыр и интересу мирового научного сообщества к этому вопросу в целом, можно надеяться, что в скором времени существование черных дыр перестанет подвергаться сомнению, и мы сможем иначе взглянуть на нашу Вселенную [11], ее структуру, природу материи [12] и пространства-времени.

### Литература

1. Сажин М.В., Сажина О.С. Современная космология//Метафизика, 2016.№ 1(19). С. 10-30.
2. Индык В.И. Стационарная и динамичная Вселенная. М.: Университетская книга, 2007. 260 с.
3. Докукин М.Ю. Концепции современного естествознания: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 147 с.
4. Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике: статьи и выступления.М.: Наука, 1992. 528 с.

5. Кауфман У.Дж. Космические рубежи теории относительности. М.: Мир, 1981. 352с.
6. Schwarzschild K. On the Gravitational Field of a Point-Mass, according to Einstein's Theory // English translation. Abraham Zelmanov J., 1916. № 1. P. 10-19.
7. Nordström G. On the Energy of the Gravitation field in Einstein's Theory // Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proc. Series B Physical Sciences, 1918. Vol. 20. P. 1238-1245.
8. Kerr R.P. Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics // Phys. Rev. Letters, 1963. Vol. 11. No. 5. P. 237–238.
9. Черепашук А.М. Черные дыры в двойных звездных системах и ядрах галактик // УФН, 2014. Т. 184. №5. С. 380-405.
10. Чугай Н. Катастрофические взрывы во Вселенной: сверхновые звёзды (лекция) // Лекторий «Знание – сила». 28 февраля 2013 г. URL: [youtube.com/watch?v=0uW9Mm1G7Hw](https://youtube.com/watch?v=0uW9Mm1G7Hw).
11. Богуславский И.В., Флек М.Б. Концептуальные основы современного синергетического предприятия // Инженерный вестник Дона, 2007, №1 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2007/38](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2007/38).
12. Докукин М.Ю. Особенности преподавания дисциплины «Физика и естествознание» в техническом университете // Инженерный вестник Дона, 2015, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3403](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3403).

### References

1. Sazin M.V., Sazina O.S. Metaphysics, 2016. № 1(19). P. 10-30 (In Rus.).
  2. Indyk V.I. Statsionarnaya I dinamichnaya Vselennaya [Stationary and dynamic Universe]. Moscow: Universitybook, 2007. 260 p (In Rus.).
  3. Dokukin M.Yu. Kontseptsii sovremennogo estestvoznaniya: Uchebnoe posobie [Concepts of modern natural sciences: Manual]. Moscow: Publishing house of BMSTU, 2010. 147 p (In Rus.).
-



4. Ginzburg V.L. O fizike i astrofizike: stat'iivystupleniya [About physics and astrophysics: articles and performances]. Moscow: Science, 1992. 528 p (In Rus.).
5. Kaufman U.J. Kosmicheskierubezryteoriiotnositel'nosti [Space boundaries of the theory of relativity]. Moscow: World, 1981. 352 p (In Rus.).
6. Schwarzschild K. English translation. Abraham Zelmanov J., 1916. № 1. P. 10-19.
7. Nordström G. Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proc. Series B Physical Sciences, 1918. Vol. 20. P. 1238-1245.
8. Kerr R.P. Phys. Rev. Letters, 1963. Vol. 11. No. 5. P. 237–238.
9. Cherepashchuk A.M. UPhS, 2014. Vol. 184. №5. P. 380-405 (In Rus.).
10. Chugay N. Lecture hall "Knowledge - force". February 28, 2013 (In Rus.)  
URL: [youtube.com/watch?v=0uW9Mm1G7Hw](https://www.youtube.com/watch?v=0uW9Mm1G7Hw).
11. Boguslavskiy I.V., Flek M.B. Inzhenernyy vestnik Dona (Rus), 2007, № 1 URL:  
[ivdon.ru/magazine/archive/n1y2007/38](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2007/38).
12. Dokukin M.Yu. Inzhenernyy vestnik Dona (Rus), 2015, № 4 URL:  
[ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3403](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3403).