

Кривизна пространства-времени: о чем говорят изображения черных дыр



Станислав Комаров,
доцент кафедры
теоретической физики
и астрофизики БГУ,
кандидат физико-
математических наук

В физике выделяют четыре принципиально различных фундаментальных взаимодействия: электромагнитное, сильное, слабое и гравитационное. С первым все мы знакомы по его проявлению при применении постоянных магнитов, а также при касании наэлектризованных тканей. Оно лежит в основе принципа действия всех электрических приборов, современных компьютеров, смартфонов и т.д. и наиболее изучено как с теоретической, так и с практической точек зрения. Сильное взаимодействие играет основную роль в ядерных реакциях, сильное и слабое – определяют различные явления в мире элементарных частиц, хотя пока не нашли широкого применения. Тем не менее ученые установили, что эти три вида взаимодействий – электромагнитное, сильное и слабое – имеют очень сходные теоретические описания, кроме того, открыты их элементарные частицы-переносчики.

Иначе обстоит дело с гравитацией: как оказалось, для ее изучения необходимы несколько иные подходы. Если с явлениями, вызванными электромагнитным взаимодействием, мы сталкиваемся в основном при использовании техники, то с гравитацией, без преувеличения можно сказать – непрерывно. Не удивительно, что исторически первой была попытка разработки теории именно гравитационного взаимодействия (И. Ньютон, 1687 г.), а только затем электромагнитного (Дж. Кл. Максвелл, 1864 г.), слабого и сильного (вторая половина XX в). С развитием всех четырех теорий стало ясно, что наше понимание гравитационного взаимодействия не вписывается в общую схему. Переломным моментом в его понимании послужило появление общей теории относительности (А. Эйнштейн, 1915 г.), которая до настоящего времени остается общепризнанной среди ученых всего мира.

При ее создании ученый исходил из принципиально иных соображений в отношении природы гравитационного взаимодействия,

нежели тех, которые привели к созданию теории электромагнетизма. Как известно из курса физики, все тела падают в гравитационном поле Земли с одинаковым ускорением, а следовательно, при равных начальных условиях описывают и одинаковые траектории. Здесь, правда, нужно еще предположить отсутствие сопротивления воздуха, поэтому на практике универсальность ускорений хорошо выполняется, например, для планет и звезд в космическом пространстве. Из указанного свойства гравитации также вытекает, что гравитационное поле можно исключить, по крайней мере локально, с помощью ускоренной системы отсчета. Последним обстоятельством пользуются, например, при проведении так называемых параболических полетов. Самолет в этом случае направляется по определенной способом рассчитанной траектории (параболе) таким образом, что люди на борту находятся в состоянии невесомости.

Данный принцип (эквивалентности эффекта ускорения системы отсчета, с одной стороны, и действия на тела гравитационного поля – с другой) А. Эйнштейн и взял в качестве отправного пункта своей теории [1]. Рассмотрим гравитационное поле, создаваемое планетой или звездой. Хорошо известно, что его действие уменьшается по мере удаления от источника. Таким образом, А. Эйнштейн пришел к выводу, что как величина масштабов всех расстояний, так и скорость хода часов будут зависеть от рассматриваемой точки пространства [1]. Этот постулат приводит к необходимости описывать данное явление при помощи неевклидовой геометрии. Остановимся на этом подробнее.

Евклидова геометрия, сформулированная в III в. до н.э., на протяжении более 2 тыс. лет считалась незыблемой математической теорией. Но все поменялось, когда в 1826 г. российский математик Н.И. Лобачевский представил в Казанском университете доклад о неевклидовой геометрии и показал ограниченность построений Евклида [2]. Следует сказать, что параллельно с Лобачевским сходной темой занимался и великий немецкий математик К.Ф. Гаусс, а также венгерский математик Я. Больяй. Они пришли приблизительно к тем же результатам, что и Лобачевский, однако К.Ф. Гаусс не решился опубликовать их при жизни, не сделал этого и Больяй [2]. Основная идея неевклидовых геометрий состоит в обобщении исходных аксиом, принятых Евклидом. Для иллюстрации их свойств на плоскости обычно переходят от плоскости к некоторой искривленной поверхности, которая допускает альтернативные определения прямых, параллельных прямых и т.д. Для наших целей будет удобнее воспользоваться мысленным примером, который придумал А. Пуанкаре и изложил в книге «Наука и гипотеза» [3].

Он предложил рассмотреть изолированную планету, у которой имеется очень горячее ядро с температурой T , при движении к поверхности планеты эта температура убывает до значения t (рис. 1).

Необходимо предположить, что в недрах этой планеты обитают некоторые разумные существа, а у всех веществ, имеющих на ней, один и тот же коэффициент теплового расширения. Как известно, при повышении температуры все тела увеличиваются в размерах, а коэффициент теплового расширения показывает количествен-

ную меру этого увеличения. Таким образом, наделив точки пространства планеты различной температурой, можно как бы моделировать изменение масштаба расстояний от точки к точке, о котором писал А. Эйнштейн. Заметим сразу, что если эти существа не будут передвигаться на большие расстояния внутри планеты, а будут жить, например, в одном «городе», то они могут и не заметить эффекта изменения температуры вовсе, если поселение достаточно мало. Ведь линейки, которыми они будут измерять тела в лабораториях и на производстве, тоже будут изменять свою длину в таком же отношении, как и измеряемые тела (здесь мы сознательно пока не говорим о возможных оптических методах измерения длин). При этом они могут создать довольно развитую науку, хотя и не будут иметь представления о температуре (от нее ничего не зависит). В этом аналогия с гравитацией, которую локально (например, в кабине самолета, совершающего «параболический полет») можно исключить из рассмотрения.

Однако если существа, проживающие в недрах планеты, будут достаточно любопытны, то отправят научную экспедицию к ее поверхности и по пути могут измерить ее радиус, начав движение непосредственно от ядра



Рис. 1. Мир Пуанкаре

(пренебрежем его размером). Для этого им нужно будет последовательно прикладывать линейку единичной длины (рис. 1). Выйдя на поверхность, они аналогичным образом измерят длину большой окружности планеты и определят величину одной из важнейших констант математики – числа π . Как известно, для этого необходимо длину измеренной окружности l разделить на удвоенный радиус r : $\pi=l/2r$. Однако после проведения вычислений они убедятся, что его величина не совпадает с известным значением 3,14.

Почему так произошло? Так как длина единичной линейки не фиксировалась специальным образом, то для простоты следует положить ее равной такой величине, чтобы на поверхности планеты она была равна 1 м. Следовательно, измеренная на поверхности окружность планеты будет совпадать с ее истинной длиной, выраженной в метрах. Однако вблизи центра длина линейки увеличится вследствие большей температуры. Поэтому измеренный радиус (количество приложенных подряд линеек) окажется меньше, нежели его истинное значение в метрах, а $\pi > 3,14$. И этот ответ будет противоречить результату «городских» математиков, так как локально геометрия описанных существ будет совпадать с нашей.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в неевклидовой геометрии в общем случае не бывает подобных фигур. Именно это имел в виду К.Ф. Гаусс, когда пытался обнаружить неевклидовость нашего трехмерного мира, проводя измерения углов треугольника, образованного тремя альпийскими вершинами – Брокен, Хорхе Хаген и Инзельберг. Как известно, даже на указанных масштабах его эксперимент не дал положительного результата [2].

Вернемся снова к гравитационному полю. Понятно, что приведенный выше пример иллюстрирует лишь некоторые его эффекты, а еще одним отличием, согласно теории А. Эйнштейна, значится то, что неевклидовым здесь является не только пространство, а пространство-время, образующее 4-мерный континуум. Тем не менее можно понять, что локально в гравитационном поле на тела не действуют никакие силы, связанные с этим полем. Например, локально все планеты Солнечной системы движутся по прямой, хотя на больших масштабах пространства и времени мы видим, что они описывают практически замкнутые траектории. Для более полного сходства с гравитацией можно рассмотреть и электромагнитные явления в рамках модели А. Пуанкаре. При этом нужно допустить, что все материалы на планете таковы, что скорость света в них уменьшается определенным образом с понижением температуры. Это необходимо для того, чтобы результаты измерений расстояний между двумя точками с помощью линеек, длины которых зависят от температуры, совпадали с данными оптических дальномеров, принцип действия которых основан на регистрации времени распространения света между этими точками. Физически это может быть выполнено с помощью установления показателя преломления вещества, зависящего от температуры. Но в среде с неоднородным показателем преломления лучи света имеют искривленную форму. Следовательно, рассмотренная планета будет искривлять лучи света, которые проходят сквозь нее. Например, подобное явление ответственно за появление миражей в пустыне, где лучи света пре-

ломляются в неоднородно нагретом воздухе, имеющем вследствие этого неоднородное распределение показателей преломления. Аналогичным образом проявляет себя и гравитационное поле: траектория распространения света, проходящая вблизи массивного объекта, испытывает отклонение от прямолинейного распространения. Этот эффект впервые был измерен экспедициями Лондонского королевского общества и Королевского астрономического общества под руководством астрономов Эддингтона и Кромелина. Они наблюдали изменение видимого положения звезд при прохождении рядом с ними солнечного диска в момент солнечного затмения 29 мая 1919 г. Измерения полностью подтвердили выводы общей теории относительности [1, 4].

Изображения черных дыр

Рассмотренная аналогия между свойствами неевклидовых геометрий и гравитационным полем и была использована А. Эйнштейном при создании общей теории относительности. Как уже отмечалось, он пошел еще дальше – с помощью неевклидовой геометрии описывал не только пространство, но пространственно-временной континуум в совокупности. Таким образом он пришел к довольно элегантной теории гравитации, предсказывающей в то же время и удивительные свойства пространства-времени на большом масштабе. Однако, как и любая другая физическая теория, она требует подтверждения. Одно из них связано с наблюдением отклонения лучей света в гравитационном поле массивного объекта. Для дальнейших доказательств необходимо было искать

новые эффекты. Следующий шаг в этом направлении был сделан К. Шварцшильдом, уже известным в то время астрономом, интересующимся работами Эйнштейна, в 1916 г. (всего через год после формулировки общей теории относительности). Изучая уравнения Эйнштейна, ученый получил новое их решение. Сначала Шварцшильд считал, что применимость его решения ограничивается гравитационным полем сферически-симметричных тел, таких как звезды и планеты. Однако затем стало ясно, что оно имеет более широкое применение – описывает особые объекты, гравитация которых столь велика, что даже излучаемый в непосредственной близости от них свет не может покинуть их поверхности. Считается, что термин «черная дыра», обозначающий такие объекты, впервые был публично употреблен физиком-теоретиком Дж.А. Уилером в 1967 г.

Наблюдательные подтверждения существования черных дыр стали появляться в 60-х гг. прошлого века, когда астрофизики начали исследовать рентгеновское и оптическое излучение от источников [5]. Пионерами в этой области были белорусский физик Я.Б. Зельдович [6] и американский астрофизик Э.Э. Солпитер (работавшие параллельно).

Описанные открытия лишь косвенно подтверждали следствия из теории Эйнштейна. Они потребовали долгой цепочки рассуждений и математических расчетов, прежде чем удалось понять, что излучающим объектом действительно является черная дыра, а не какой-то иной вид небесных тел, таких как звезды или галактики. Поэтому важно было получить прямое доказательство существования черной дыры, увидев ее непосредственно. Такую воз-

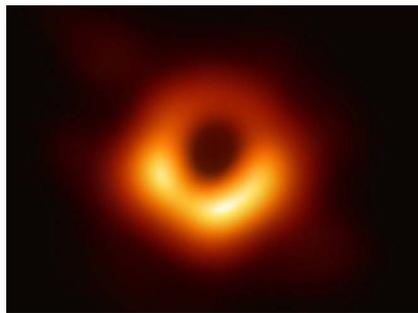


Рис. 2. Изображение сверхмассивной черной дыры в галактике M87, полученное с помощью EHT

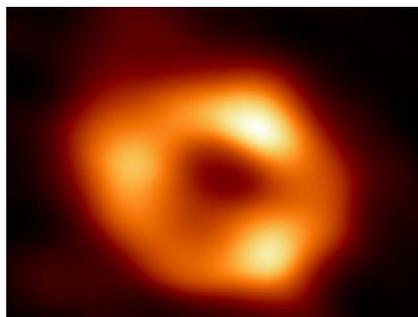


Рис. 3. Изображение сверхмассивной черной дыры Sagittarius A* (Sgr A*), находящейся в центре нашей галактики, полученное с помощью EHT

можность предоставили астрофизики из коллаборации Event Horizon Telescope (EHT), в 2019 г. С помощью специальной сети телескопов – интерферометра проводились наблюдения за сверхмассивной черной дырой, расположенной в галактике M87 [7, 8], находящейся на расстоянии около 50 млн световых лет от Земли. Такое большое расстояние до объекта наблюдения не позволило ученым сразу сформировать изображение черной дыры. Для этого понадобилось аккумулировать данные наблюдений в течение нескольких лет (2017–2019 гг.). Полученное таким образом изображение представлено на рис. 2.

Важную роль в подобных астрофизических наблюдениях играет выбор области спектра электромагнитного излу-

чения, в которой производится наблюдение.

Как правило, рабочий диапазон спектров телескопов ограничен многими факторами. Например, электромагнитное излучение на длинных волнах сильно искажается плазмой и межзвездной средой. Невозможность использования слишком коротких волн в режиме интерферометра вызвана техническими сложностями. Event Horizon Telescope представляет собой интерферометр со сверхдлинной базой – сложную систему из телескопов, находящихся в различных точках земного шара (в Чили, на Гавайях (США), в Мексике, Испании, Аризоне и Калифорнии (США), Гренландии, Франции и в Антарктиде) [8]. Расстояние между наиболее удаленными телескопами такой системы и называют базой интерферометра, а ее разрешающая способность (минимальное угловое расстояние, на котором два источника света видны как отдельные) равна разрешающей способности одного телескопа, диаметр объектива которого совпадает с размером базы (то есть в нашем случае – диаметром Земли). Однако такая техника требует поддержания небольшого уровня шумов, который возрастает с уменьшением длины волны используемой части спектра [7]. Анализ всех указанных причин привел инженеров коллаборации EHT к решению использовать для наблюдений длину волны 1,3 мм, что, конечно же, не входит в диапазон оптического излучения. Поэтому результирующую картинку пришлось окрасить уже в произвольные цвета, придающие ей максимальный эффект.

Изображение сверхмассивной черной дыры в центре нашей галактики было получено той же коллаборацией в 2022 г. [9] (рис. 3).

Следует отметить, что альтернативный подход к построению интерферометра со сверхдлинной базой реализован в рамках международного проекта «Радио Астрон» Российской академией наук (АКЦ ФИАН) [10–12] по принципу «космос – Земля»: один из радиотелескопов находится на искусственном спутнике «Спектр-Р», на высокой орбите (апогей – около 300 тыс. км), а другие – на Земле. Таким образом, длина базы становится на порядок больше. Однако, в отличие от проекта Event Horizon Telescope, на «РадиоАстроне» используются длины волн сантиметрового и дециметрового диапазонов. Оказывается, разрешающие способности телескопов обоих проектов примерно сопоставимы. Но волны сантиметрового диапазона уже испытывают гораздо большие искажения при проникновении сквозь плазму, окружающую компактные астрофизические объекты. В этом причина того, что черную дыру удалось увидеть лишь коллаборации ЕНТ. «РадиоАстрон» же выполнял задачи изучения пульсаров, крупных образований вблизи сверхмассивных черных дыр и др. [10]. В ближайшее время планируется начало его нового проекта «Миллиметр», где тоже предполагается использование интерферометра космос – Земля, однако уже в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [10, 12]. В случае успеха миссии можно будет увидеть много новых изображений черных дыр, более содержательных и важных с научной точки зрения.

Наиболее важным элементом на подобных изображениях является так называемая тень черной дыры. Именно эта область на фоне светящейся плазмы, обычно окружающей черные дыры, и

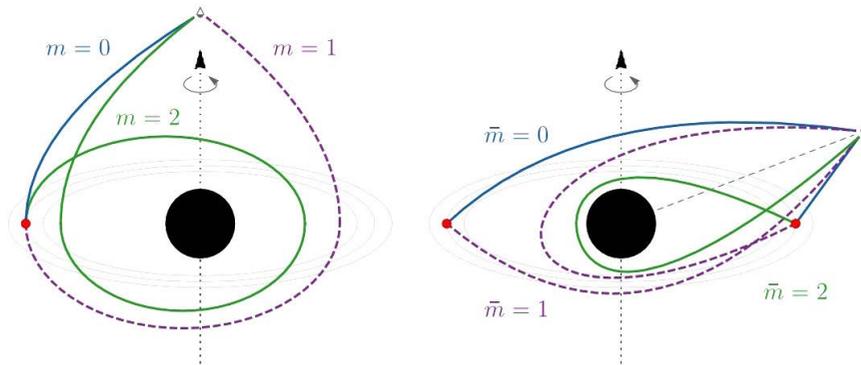


Рис. 4. Схематическое изображение различных типов траекторий луча света в окрестности черной дыры [13]

говорит нам о ее существовании в центре. Форма тени формируется вследствие характерного искривления траекторий лучей света в сильном гравитационном поле (рис. 4). Эта особенность и позволяет проводить проверку теорий гравитации по наблюдательным данным.

Так как общая теория относительности связывает гравитацию с геометрией пространства-времени, то массу черной дыры можно определить двумя способами. Один заключается в ее определении по размеру тени (геометрия), а другой – по динамике плазмы, движущейся в окрестности черной дыры (поле гравитации) [7]. Соответствующие расчеты показали согласованность наблюдаемых данных с общей теорией относительности.

Кроме того, анализ тени позволил сделать и другие важные выводы.

Например, черная дыра является не единственной гипотезой относительно компактного объекта в M87. Существует еще несколько других, маловероятных, но возможных гипотез. Так, наблюдения тени M87 позволили исключить из числа потенциальных кандидатов такие экзотические объекты, как «голые сингулярности» и кротовые норы [7].

Более того, теоретиками всего мира разрабатываются гипотезы, обобщающие теорию гравитации Эйнштейна и в основном соответствующие ее представлениям. Однако технически они могут формулироваться с помощью несколько иных математических конструкций (как правило, более сложных). Так как при использовании той или иной теории гравитации форма тени может несколько отличаться, то по ее изображению можно сделать вывод о том, какие из теорий ошибочны. На данном этапе разрешающая способность интерферометров недостаточно велика для того, чтобы делать выводы о форме тени. Однако с появлением новых приборов, таких как «Миллиметр», эта задача станет вполне реальной [14].

Таким образом, на примере одного из астрофизических открытий последнего времени видно, как получение и исследование изображения черной дыры привело к решению сразу нескольких физических и технических задач. К ним можно отнести разработку и создание принципиально новых измерительных приборов (интерферометров со сверхдлинной базой, работающих в диапазоне коротких волн), исследование космических объ-

ектов как в нашей галактике, так и за ее пределами, подтверждение идей Эйнштейна о связи геометрии и гравитации. Не следует сомневаться, что в будущем это приведет к лучшему пониманию нашего мира и созданию новых, еще более впечатляющих технологий. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эйнштейн А. Теория относительности. Избранные работы. – Ижевск, 2000.
2. Чистяков В.Д. Беседы о геометрии Лобачевского. – Минск, 1973.
3. Пуанкаре А. О науке: Пер. с французского / под ред. Л.С. Понтрягина. – 2-е изд. стер. – М., 1990.
4. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация: в 3-х т., пер. с англ. М.М. Баско / под ред. В.Б. Брагинского и И.Д. Новикова. – М., 1977.
5. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. «Черные дыры» во Вселенной // Природа. 1972. №4. С. 28–32.
6. Зельдович Я.Б. Судьба звезды и выделение гравитационной энергии при аккреции. Докл. АН СССР. – 1964. Т. 155, №1. С. 67–69.
7. Akiyama [et. al.]. (The Event Horizon Telescope Collaboration). First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // The Astrophysical Journal Letters. 2019. Vol. 875:L1. 17.
8. Akiyama [et. al.]. (The Event Horizon Telescope Collaboration). First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation // The Astrophysical Journal Letters. 2019. Vol. 875:L2. P. 28.
9. Akiyama [et. al.]. (The Event Horizon Telescope Collaboration). First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way // The Astrophysical Journal Letters. 2022. Vol. 930:L12. P. 21.
10. Кардашев Н.С. «Радиоастрон» – радиотелескоп, много больший Земли. Научная программа // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, №11. С. 1191–1202.
11. Кардашев Н.С. [и др.]. Технические решения и практика эксплуатации приборного комплекса космического телескопа наземно-космического радиоинтерферометра «РадиоАстрон» // Труды института прикладной астрономии РАН. 2018. Вып. 47. С. 31–37.
12. Астрокосмический центр ФИАН // <https://millimetron.ru>.
13. Gralla S., Lupsasca A. Lensing by Kerr black holes // Phys. Rev. D. // 2020. Vol. 101. 044031.
14. Зенин О.И., Алексеев С.О., Прокопов В.А. Тени черных дыр как источник проверки расширенных теорий гравитации // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2023. Вып. 1. С. 65–70.

Гамма-всплески — ярчайшие вспышки во Вселенной



Евгений Деришев,
старший научный
сотрудник Института
прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
кандидат физико-
математических наук

Детективная история. Открытие гамма-всплесков

Истории астрономических открытий складывались по-разному. Некоторые из них, надев изрядно шуму, впоследствии были опровергнуты. Так случилось с «открытием» каналов на Марсе итальянским астрономом Джованни Скиапарелли. Увы, длинные и почти прямые протоки на поверхности Красной планеты оказались вовсе не свидетельством трудолюбия марсиан, а всего лишь результатом несовершенства телескопов того времени.

Другие открытия, казавшиеся поначалу совершенно невероятными, быстро получали объяснение в рамках уже известного. Так произошло с пульсарами. Импульсы их радиоизлучения повторяются с совершенно одинаковыми интервалами по времени (выражение «как по часам» здесь будет преуменьшением – пульсары «тикают»