



# Занимательная Наука

Усенков Дмитрий Юрьевич

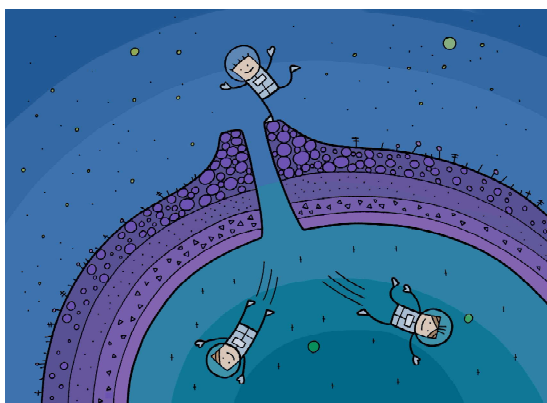
## ВПЕРВЫЕ В ИСТОРИИ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА: ИЗОБРАЖЕНИЕ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

*Чёрная дыра* – область пространства-времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что покинуть её не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света, в том числе кванты самого света. Граница этой области называется горизонтом событий, а её характерный размер – гравитационным радиусом.

(Википедия)

В начале апреля 2019 года состоялось эпохальное событие в сфере астрономических наблюдений: впервые было получено изображение черной дыры – загадочного объекта, так привлекавшего (и привлекающего) к себе внимание как ученых, так и фантастов. Свойства черных дыр действительно очень необычны. Неимоверное по мощности гравитационное поле, не выпускающее из своих объятий не только веще-

ство, но даже и свет. Особое коварство черных дыр – никакое тело и ни один космический корабль, который пересечет невидимую границу «горизонта событий», никогда не сможет покинуть черную дыру и будет неизбежно разорван ее гравитационным полем (приливными силами) на атомы и поглощен ею. Изменение течения времени, происходящее вблизи черной дыры. Такое свойство, как образование «кротовых нор» в ткани пространства, возможно, позволяющих сквозь черные дыры телепортироваться с одного края Вселенной на другой или даже проникать в прошлое, как на машине времени... Но одно дело – искать теоретические обоснования, проводить вычисления по формулам или создавать научно-фантастические романы и кинофильмы, и совсем другое – хотя бы увидеть, как выглядит черная дыра. А вот с этим у астрономов всегда была проблема: ведь все известные черные дыры не только находятся на невероятных расстояниях от Земли, в том числе в самом центре ядра галактик, но и считались «принципиально не наблюдаемыми»: да и как мож-



...образование «кротовых нор» в ткани пространства...

но увидеть объект, который совсем не испускает свет, полностью поглощая его своим гравитационным полем?

### ОТКУДА БЕРУТСЯ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Согласно современным представлениям ученых – астрофизиков, черная дыра представляет собой очень компактное по размерам сверхмассивное тело.

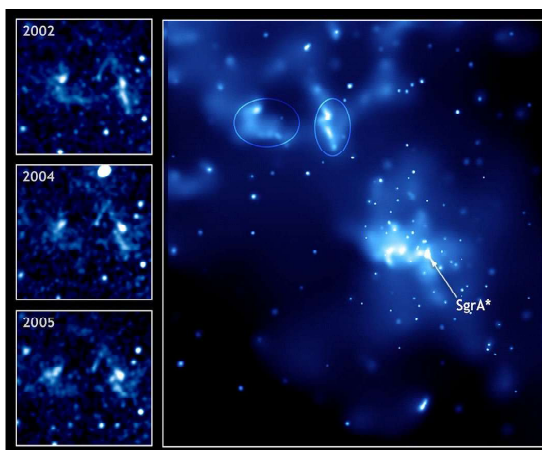
Согласно современным представлениям, возможно четыре основных сценария образования черных дыр.

- **Гравитационный коллапс** (катастрофическое сжатие) **массивной звезды** – после «выгорания» внутренности звезды и прекращения в ней термоядерных реакций происходит остывание звездного вещества и его сжатие. В зависимости от исходной массы звезды и ее вращательного момента такое гравитационное сжатие может остановиться на определенном этапе (тогда звезда превращается в белый карлик или в нейтронную звезду, сбрасывая внешнюю часть вещества и порождая взрыв сверхновой). Но при определенных условиях (в частности, если масса звезды превышает массу Солнца в три и более раз) сжатие звездного ядра становится практически неограниченным, и звезда превращается в черную дыру – компактный объект диаметром не более нескольких десятков километров при массе от 2,5 до 5,6 массы Солнца (а прикиньте-ка плотность вещества в таком объекте!). Позже такая черная дыра может еще увеличиваться в размерах за счет поглощения окружающего вещества (такой процесс называется аккрецией).

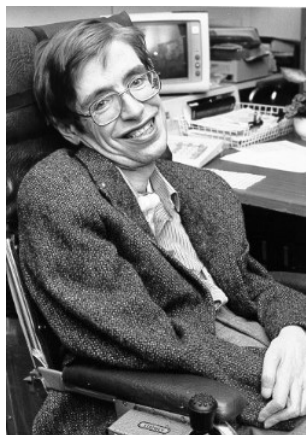
- **Коллапс вещества в центральной части галактики либо протогалактического газа еще в момент образования галактики.** Согласно современным теориям, такие черные дыры являются ядром любой или почти любой спиральной или эллиптической галактики; не исключение – и наша Галактика, в центре которой находится черная дыра под названием Стрелец А\* (рис. 1). Такие галактические черные дыры являются сверхмассивными: так, чёрная дыра Стрелец А\* имеет массу около  $4,3 \cdot 10^6$  масс Солнца, а масса

черной дыры в центре гигантской эллиптической галактики М87 в созвездии Девы должна составлять как минимум 6,4 миллиарда солнечных масс.

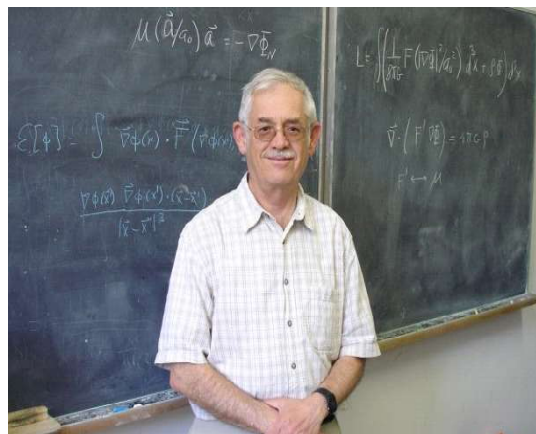
- **Первичные черные дыры**, согласно не подтвержденным пока гипотезам, могли образовываться путем коллапса из различных отклонений однородности гравитационного поля и плотности в сверхплотной материи, которые, возможно, существовали в начальные моменты жизни Вселенной. Такие объекты могут иметь совсем небольшие размеры и массу от  $10^{14}$  до  $10^{23}$  кг (всего-навсего масса среднего по величине астероида) и могут быть одной из составляющих пресловутой «темной материи». Одна из теорий, описывающих возможный механизм формирования первичных черных дыр, – теория струн, сочетающая в себе идеи квантовой механики и теории относительности и изучающая взаимодействие не точечных частиц, а одномерных протяженных объектов – квантовых струн. Теория струн, в частности, позволяет предполагать формирование исключительно плотных мелкомасштабных структур из струн и других описываемых этой теорией элементов – многомерных объектов, именуемых «бранами», часть которых могут иметь более трех измерений. При этом черная дыра может быть сформирована из струн и бран очень большим числом способов, и это количество микросостояний точно соответствует энтропии чер-



**Рис. 1.** Стрелец А\* (изображение снято с помощью Чандра, рентгеновской обсерватории НАСА (<http://chandra.harvard.edu/photo/2007/gcle>))



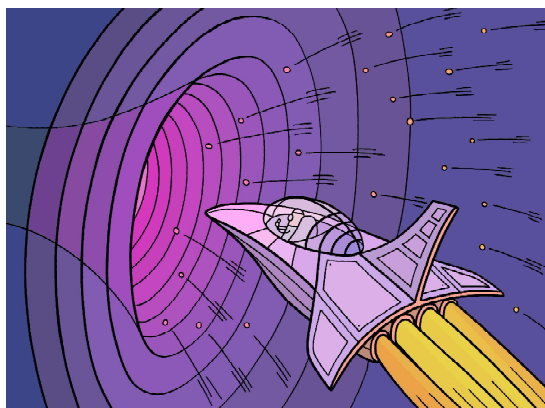
**Стивен Уильям Хокинг (1942–2018)**  
(NASA StarChild, <https://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/StarChild.html>)



**Яков Бекенштейн (1974–2015)**  
(<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/87/Bekenstein100.JPG>)

ной дыры, предсказанной в 1970-е годы английским физиком и космологом Стивеном Хокингом и его израильским коллегой Яковом Бекенштейном.

• **Квантовые черные дыры** могут (теоретически) возникать в результате ядерных реакций и представляют собой микроскопические объекты. Минимально возможные расчетные размер и масса такой черной дыры («планковская черная дыра») составляют около  $10^{25}$  метра и  $10^{25}$  грамма соответственно. Именно катастрофы из-за возникновения таких черных дыр так боялись многие в момент запуска в работу знаменитого Большого адронного коллайдера, однако поскольку для синтеза такой черной дыры требуется недостижимая сегодня для человечества энергия  $10^{26}$  эВ, эти опасения оказались напрасными.



*...некий космический корабль неосторожно приблизился к черной дыре...*

## СВОЙСТВА ЧЕРНЫХ ДЫР

**Неограниченное падение.** Предположим, что некий космический корабль неосторожно приблизился к черной дыре и выключил двигатели, чтобы начать свободное падение в поле тяготения черной дыры. Как мы знаем, любое тело, свободно падающее под действием сил гравитации, находится в состоянии невесомости и с соответствующим ускорением свободного падения (зависящим от масс взаимодействующих тел) движется по направлению к центру притягивающего тела. При этом под действием порождаемых мощной гравитацией черной дыры приливных сил звездолет будет растягиваться в направлении вдоль радиуса притягивающего тела. Величина приливных сил при приближении к черной дыре неограниченно возрастает – вплоть до бесконечно больших значений при приближении к центру черной дыры, так что в какой-то момент приливные силы превысят предел прочности звездолета, и он будет разорван на части.

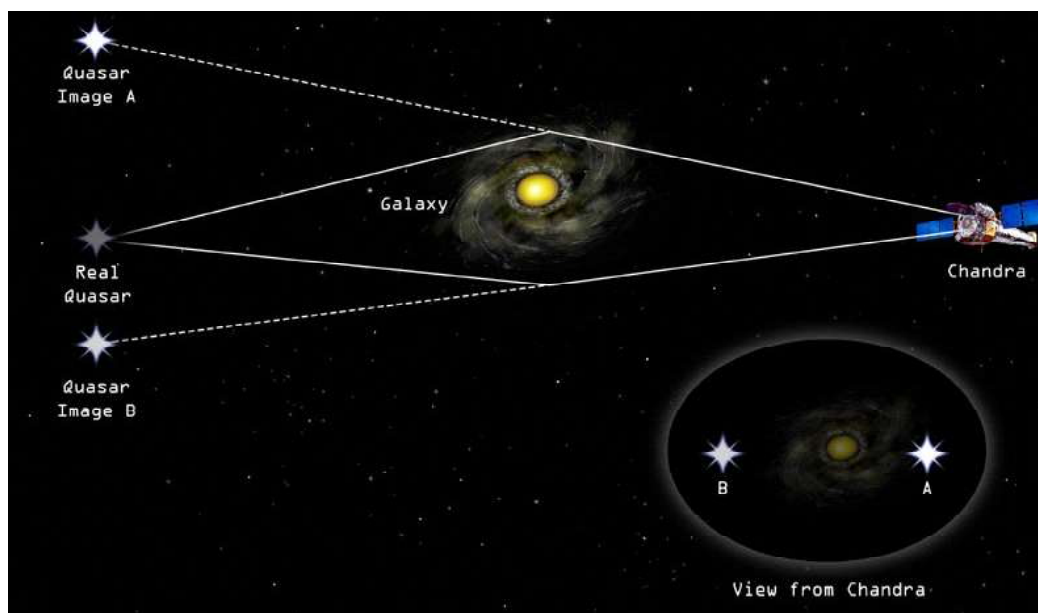
Предположим, однако, что наш «умозрительный» наблюдатель, находящийся на борту звездолета, способен выдержать натиск приливных сил. Что он увидит в процессе падения? Для него оно будет обычным ускоренным движением до тех пор, пока звездолет вместе с наблюдателем не будет поглощен черной дырой и, что наиболее вероятно, не превратится в сверхплотную мате-

рию, в которой не сохраняется даже атомарная структура. Когда же падающий в черную дыру звездолет пересечёт горизонт событий, для наблюдателя, находящегося на его борту, ничего заметно не изменится, но после этого улететь прочь от черной дыры станет невозможно, даже двигаясь со скоростью света: звездолет будет обречен.

С точки же зрения внешнего наблюдателя, падение в черную дыру выглядит иначе. Сначала звездолет, находясь в свободном падении, постепенно будет разгоняться под действием сил тяжести по направлению к центру черной дыры. Но затем, по мере приближения тела к горизонту событий, испускаемые (или отраженные) звездолетом световые кванты будут всё больше «затормаживаться» гравитационным полем черной дыры, а в ее сверхмощном поле тяготения проявляется гравитационное замедление времени. В результате внешнему наблюдателю будет казаться, что падающий в черную дыру звездолет будет постепенно сплющиваться в направлении радиуса черной дыры и замедляться, приближаясь к горизонту событий, а затем практически остановится, так что для сторонних наблюдателей падение в чёрную дыру будет длиться бес-

конечно долго. Впрочем, некоторые исследователи предполагают, что, поскольку масса черной дыры с поглощением падающего на нее тела возрастет, радиус горизонта событий этой черной дыры немного увеличится, и падающее тело окажется внутри горизонта событий все же за какое-то конечное время. Собственно же пересечение горизонта событий внешний наблюдатель не увидит никогда (в том числе потому, что фотоны, испускаемые звездолетом, будут навсегда захвачены гравитационным полем черной дыры).

**Гравитационная линза.** Гравитационное поле черной дыры настолько велико, что изменяет траектории движения фотонов вблизи нее, подобно тому, как изменяет направление световых лучей обычная линза. В результате объект, расположенный за черной дырой, который должен был бы быть заслонен ею и не виден, окажется визуально «размазан» в пространстве по дуге вокруг нее либо превращен в несколько «мнимых» изображений по бокам массивного объекта (рис. 2). Впрочем, гравитационное линзирование – это не исключительный признак одних только черных дыр, это явление наблюдается вблизи любых тяготеющих

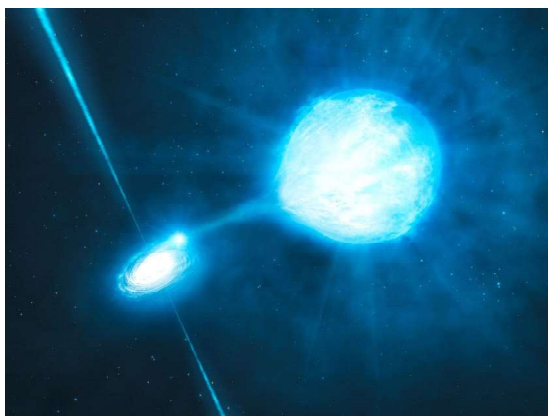


**Рис. 2.** Эффект гравитационного линзирования в поле тяготения массивной галактики: вместо одного расположенного за ней квазара формируются два его мнимых изображения ([https://naked-science.ru/sites/default/files/images\\_custom/2017/08/apm08279\\_grav\\_lens.jpg](https://naked-science.ru/sites/default/files/images_custom/2017/08/apm08279_grav_lens.jpg))



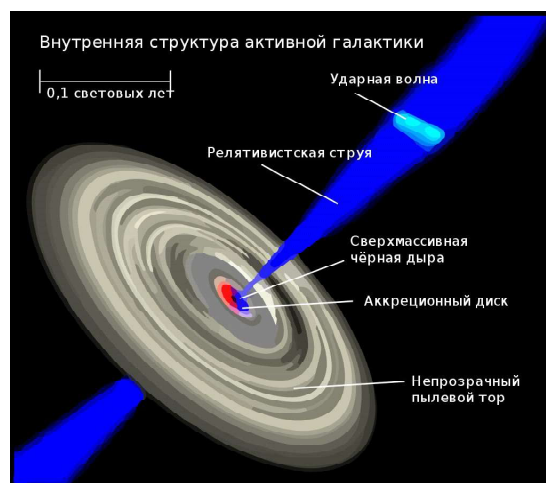
объектов, например крупных галактик.

**Аккреция (поглощение вещества).** Если черной дырой является, например, одна из звезд двойной звездной системы, то черная дыра будет притягивать к себе и поглощать вещество своей «соседки». Но, поскольку из-за взаимного вращения звезд относительно друг друга в такой системе имеется значительный момент вращения, частицы газа не смогут падать на черную дыру строго по ее радиусу. Струи газа будут в процессе падения закручиваться вокруг черной дыры, постепенно увеличивая скорость движения, разогреваясь и образуя вокруг черной дыры аккреционный диск. А в направлениях, перпендикулярных плоскости аккреционного диска, под действием магнитных полей будет происходить выброс струй вещества с огромными (релятивистскими) скоростями (джеты) и рентгеновского излучения. Подобные джеты наблюдаются в ядрах многих галактик (и Стивен Хокинг сумел доказать, что такие выбросы порождаются расположенными в центре галактик сверхмассивными черными дырами). Если ось вращения такой системы в пространстве относительно Земли не совпадает с направлением джетов, то джеты описывают конус и могут периодически «чиркать» своим узконаправленным рентгеновским излучением, давая в приемнике радиотелескопа соответствующие всплески (рис. 3, 4).



**Рис. 3.** Чёрная дыра NGC 300 X-1 (рисунок; ESO/L. Calzada/M.Kornmesser – <http://www.eso.org/public/images/eso1004a/>, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9551709>)

**Испарение черных дыр.** До некоторого времени черные дыры считались стабильными объектами, которые могут только увеличиваться, поглощая внешнее вещество. Однако такие представления о черной дыре вначале были скорректированы для вращающихся черных дыр советскими (российскими) физиками А.А. Старобинским и Я.Б. Зельдовичем (1974 г.), а затем – уже в общем случае – Стивеном Хокингом в 1975 г. Хокинг предположил, что вблизи горизонта событий гравитационное поле как бы «поляризует» вакуум, из-за чего в нем могут рождаться пары из частицы и античастицы. И если при этом одна из них окажется чуть ниже горизонта событий, то будет поглощена черной дырой, а другая, оказавшаяся чуть выше горизонта событий, может улететь прочь. При этом улетающая частица будет уносить с собой часть энергии, а значит, – и массы черной дыры, так что черная дыра будет постепенно уменьшаться, словно бы испаряясь в пространство. Этот гипотетический эффект так и называется: испарение (или излучение) Хокинга. Причем, чем меньше становится черная дыра, тем сильнее проявляются эффекты ее испарения, так что время жизни черных дыр является конечным, а заключительный этап испарения имеет характер взрыва. Впрочем, взрывное ис-



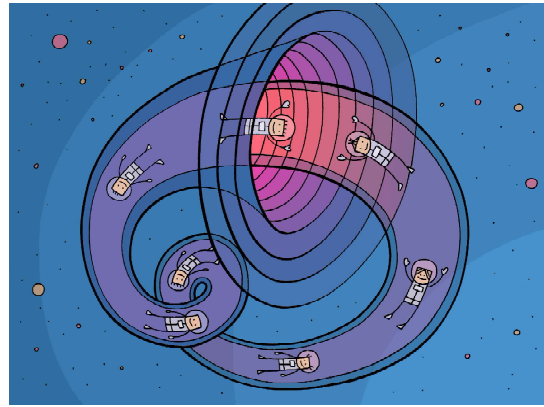
**Рис. 4.** Джеты из ядра активной галактики, которым является черная дыра с аккреционным диском (<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46857319>)

парение – это лишь одна из гипотез. Возможно, что в конце этого процесса все же останется квантовая черная дыра минимально возможных (планковских) размеров. Во всяком случае, такое явление, как взрыв черной дыры, должно бы оказаться достаточно заметным, но за все время астрономических наблюдений ничего подобного пока не обнаружено.

**Уничтожение информации в черной дыре.** Это гипотетическое явление сильно беспокоит ученых. Действительно: если падение в черную дыру некоторого тела увеличивает ее массу, а затем за счет испарения масса черной дыры вновь уменьшится до первоначальной, то можно считать, что черная дыра попросту преобразовала вещество упавшего на нее тела в соответствующие излучения. Но поскольку характер этих излучений не зависит от природы упавшего тела, можно считать, что информация об этом теле полностью уничтожена черной дырой, и это противоречит постулатам квантовой механики.

Если же считать, что испарения черных дыр (которое является пока чисто теоретическим) не происходит, то все еще интереснее. Тогда возможна ситуация, что попавшая внутрь черной дыры информация продолжает там находиться, хотя и не наблюдаема снаружи. Или же, как рискуют предположить некоторые исследователи, вещество и информация, попавшие внутрь черной дыры, могут телепортироваться в другие вселенные, параллельные нашей (и там, соответственно, выбрасываются из своего рода «анти – черных дыр», называемых такими исследователями «белыми дырами»).

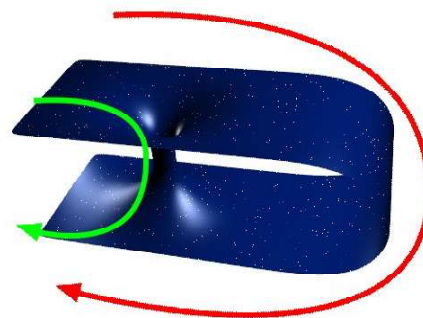
А возможно, – считают некоторые, – что в гравитационных полях черных дыр меняется само пространство-время, так что образуются «замкнутые времениподобные траектории». В результате появляется возможность совершать путешествия во времени как в прошлое, так и в будущее. Но тогда возможно возникновение всем известного «парадокса путешествия во времени», когда гость из будущего может своими действиями так изменить прошлое, что в новом будущем станет невозможно появление самого этого путешественника во времени.



*...в гравитационных полях черных дыр... образуются «замкнутые времениподобные траектории».*

Стивен Хокинг предположил, что в будущем с развитием теории квантовой гравитации в ней будут найдены условия, запрещающие существование таких замкнутых времени подобных линий, и, соответственно, перемещение по ним во времени является невозможным. Другие исследователи пытаются решить этот парадокс предположением, что черные дыры обеспечивают путешествие не во времени, а в чужие, параллельные вселенные.

Впрочем, искривление пространства-времени может порождать и такие эффекты, как «кротовая нора» (или «червоточина») – тоннель в пространстве, позволяющий почти мгновенно переместиться в другое место нашей же Вселенной либо в другие вселенные (рис. 5). Вот, правда, способно ли



**Рис. 5.** Схематическое изображение «кротовой норы» как «короткого пути» в другое место Вселенной, обычный полет к которому занимает гораздо больше времени (Panzi – English Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=245478>)

хоть какое то материальное тело пройти по «кротовой дыре», не будучи разорванным на атомы приливными силами черной дыры, – вопрос отдельный.

### КАК ОБНАРУЖИТЬ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Как же можно обнаружить черную дыру, если сама она принципиально не наблюдается: ведь никакие излучения не могут покинуть горизонт событий? Только косвенными наблюдениями – обнаружением различных явлений, связанных с черными дырами.

**Обнаружение объектов с подходящей массой.** По траекториям движения других космических объектов (звезд, радиоисточников, газовых дисков) вокруг массивного объекта можно расчетным путем оценить возможную массу этого объекта. И если соответствующий объект имеет массу, достаточную для черной дыры, но при этом сам ничего не излучает, то можно предположить, что он и является черной дырой.

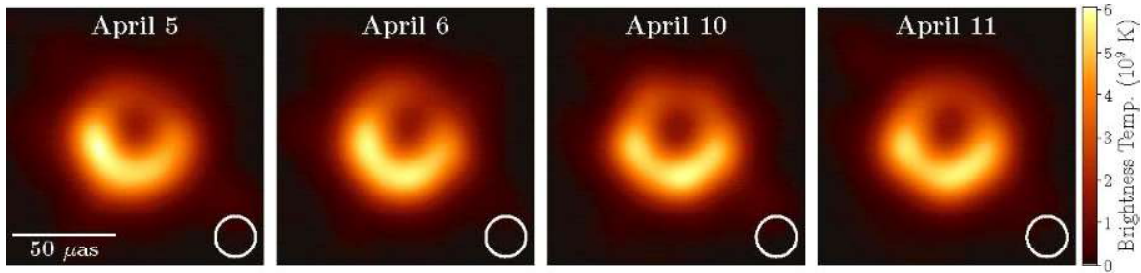
**Вычисление отношения массы к светимости.** Основной на сегодня метод поиска сверхмассивных чёрных дыр – исследование распределения яркости и скорости движения звёзд в зависимости от расстояния до центра Галактики. Распределение яркости при этом определяется при фотографировании галактик, а скорости звёзд – по красному смещению линий в их спектре. Чёрная дыра имеет большую массу при низкой светимости, поэтому высокое отношение массы к светимости  $M/L$  является одним из признаков наличия в центре галактики сверхмассивной чёрной дыры. Обычное скопление звёзд имеет отношение  $M/L$  порядка единиц (так как масса и светимость выражаются в массах и светимостях Солнца), и если будет обнаружен объект с отношением  $M/L$  много больше единицы (а для некоторых галактик  $M/L > 1000$ ), то это считается признаком наличия сверхмассивной чёрной дыры. Однако возможны и иные объяснения больших значений отношения массы к светимости: например, это могут быть скопления белых или коричневых карликов, нейтронных звёзд либо чёрных дыр обычной массы.

**Изучение аккреции газа.** Если подозрительный объект имеет аккреционный диск, то возможно измерение его параметров – скорости вращения газа, а также размеров источника радиоизлучения. Скорость вращения газа позволяет при этом оценить массу центрального объекта (хотя и не указывает однозначно, что это – именно черная дыра). Размеры же радиоисточника, определяемые с учетом гравитационного линзирования в сопоставлении получаемого при линзировании излучающего пятна с размерами линзирующего тела, позволяют определить с какой-то долей вероятности, что источник, являющийся точечным и сосредоточенный в области рядом с предполагаемой черной дырой, является аккреционным диском либо джетом, выброшенным из этого диска, а не каким-либо другим, отличным от черной дыры массивным космическим объектом.

Главное же препятствие наблюдения излучения вблизи черных дыр – это недостаточная разрешающая способность радиотелескопов, не позволяющая различать области пространства с размером того же порядка, что и гравитационный радиус черной дыры. Только черной дыра, находящаяся в центре нашей Галактики, еще как-то поддается наблюдениям при помощи радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой на пределе разрешающей способности крупнейших радиотелескопов. Поэтому для центральных объектов других галактик можно лишь с определенной степенью предполагать, что это – именно черные дыры...

### ЭПОХАЛЬНОЕ СОБЫТИЕ

Вернемся, однако, к упомянутому в начале этой статьи эпохальному событию. В апреле нынешнего, 2019 года астрономы наконец-то смогли получить первое в истории изображение черной дыры, располагающейся в центре галактики M87. На этом изображении видно яркое кольцо света, изгибающегося в интенсивной гравитации вокруг черной дыры, которая в 6,5 миллиардов раз массивнее Солнца (рис. 6). Это – самое убедительное на сегодня доказательство существования сверхмассивных черных дыр



**Рис. 6.** Снимки ядра галактики M87, сделанные в четыре последовательных ночи наблюдений. Белый кружок справа внизу на каждом изображении демонстрирует разрешение радионаблюдений. На всех четырех изображениях имеется устойчивое яркое кольцо с усиленным излучением в южной части (Event Horizon Telescope Collaboration, [https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus\\_on\\_EHT](https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_EHT))

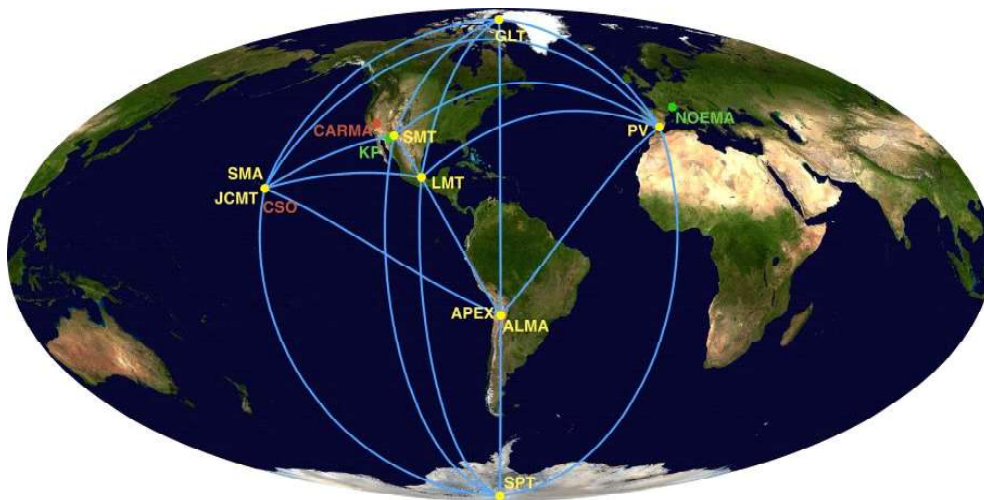
и одновременно – новая возможность изучения черных дыр, их горизонтов событий и гравитационных явлений.

Эта черная дыра погружена в яркий диск светящегося газа, а на месте ее расположения видна темная область, напоминающая тень и образующаяся из-за гравитационного искривления света и его захвата горизонтом событий. Такое явление было предсказано общей теорией относительности Эйнштейна, но никогда ранее никем не наблюдалось. Область тени в середине светлого пятна – это максимально возможное приближенное изображение черной дыры, представляющей собой абсолютно темный объект, не выпускающий из себя свет. Настоящая же граница черной дыры (ее «горизонт событий») примерно в 2,5 раза меньше отбрасываемой им

тени. А световое кольцо, окружающее тень черной дыры, возникает из-за того, что черная дыра работает подобно линзе.

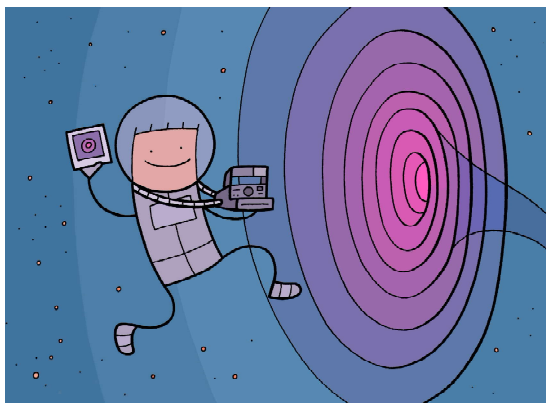
Но каким же образом было получено такое высокое разрешение, если ни один из существующих сегодня на Земле радиотелескопов не способен его обеспечить? Ответ прост: то, что невозможно по отдельности, может быть достижимо объединенными силами!

Изображение черной дыры M87 было получено при помощи радиотелескопа «Горизонт событий» (Event Horizon Telescope, EHT). Но это – не единое устройство, а массив из восьми отдельных наземных радиотелескопов, расположенных в шести географических точках (рис. 7): Аризона (США), Чили, Гавайи (США), Мексика, Южный по-



**Рис. 7.** Карта расположения радиотелескопов, входящих в проект EHT. Станции, работавшие в 2017 и 2018 гг., обозначены соединительными линиями и отмечены желтым цветом, участки, находящиеся в настоящее время в эксплуатации, отмечены зеленым, а устаревшие участки – красным ([https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus\\_on\\_EHT](https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_EHT))





...астрономы наконец-то смогли получить первое в истории изображение черной дыры...

люс и Испания, созданный в рамках международного сотрудничества для астрономических наблюдений. В работе ЕНТ используется метод интерферометрии с очень длинной базой (VLBI), который синхронизирует телескопические объекты по всему миру и использует вращение нашей планеты для формирования единого виртуального телескопа размером с Землю, ведущий наблюдения на длине волны 1,3 мм. Подобная система из телескопов, разнесённых на тысячи километров, имеет разрешающую способность в 20 угловых микросекунд – такое разрешение имел бы телескоп с тысячекиллометровым зеркалом. Если бы это был обычный оптический телескоп, то через него можно было бы читать газету, находящуюся на расстоянии, как между Москвой и Владивостоком.

### Литература

1. Event Horizon Telescope (сайт проекта) (<https://eventhorizontelescope.org>)
2. Focus on the First Event Horizon Telescope Results // The Astrophysical Journal Letters ([https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus\\_on\\_EHT](https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_EHT))
3. Вглядываясь в бездну: астрономы впервые получили изображение чёрной дыры // «Вести – наука» (<https://nauka.vesti.ru/article/1201778>)
4. Первый снимок черной дыры // Наука и жизнь (<https://www.nkj.ru/news/35959>)
5. Чёрная дыра // Википедия ([https://ru.wikipedia.org/wiki/Чёрная\\_дыра](https://ru.wikipedia.org/wiki/Чёрная_дыра))



Ежедневно в течение всего периода наблюдений каждый радиотелескоп собирал около 350 терабайт данных, которые стекались на суперкомпьютеры проекта в Институте радиоастрономии Макса Планка (Германия) и обсерватории Хэйстек (MIT, США), где и синтезировалось результирующее изображение. При этом в работе принимали участие около 200 астрономов из разных стран и 13 научных центров, а окончательные результаты, опубликованные в апреле 2019 года, – от формирования изображений до их интерпретации, – получены благодаря работе огромного числа специалистов по инструментам, алгоритмам, программному обеспечению, моделированию и теории.

Как отмечают исследователи, детали строения полученного изображения тени черной дыры M87 на удивление хорошо соответствуют ранее наработанным теоретическим моделям и, в частности, позволяют оценить массу этой чёрной дыры в 6,5 миллиарда массы Солнца.

Кстати, проект ЕНТ предполагал наблюдение не только черной дыры внутри галактики M87, но и нашей «родной» чёрной дыры в центре Галактики Млечный Путь. Эти наблюдения проводились в 2017 году одновременно с наблюдениями M87, но их результаты пока еще не опубликованы.

Усенков Дмитрий Юрьевич,  
ГБОУ СОШ № 1360, г. Москва.