

Как извлекать энергию из вращающейся черной дыры



Николай Прокопеня, старший научный сотрудник Центра квантовой оптики и квантовой информатики Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, кандидат физико-математических наук, доцент

Открытие квазаров в 1963 г., а затем обнаружение радиопульсаров, рентгеновских и гамма-источников излучения стало началом развития новой области науки – релятивистской астрофизики. В результате появилась идея о том, что в центре каждой галактики находится сверхмассивная черная дыра.

В марте 1963 г. в журнале «Nature» вышла статья трех астрономов (С. Hazard, M.B. Mackey, A.J. Shimmins), где было показано, что радиоисточник 3C 273 (обнаруженный в 1959 г. в ходе третьего кембриджского обзора небосвода) имеет две компоненты, которые отделены примерно на 20 угловых секунд. При этом одна из них имела очень необычный спектр излучения и получила название квазар, или квази-звездный источник (похожий на звезду). Дальнейшие наблюдения показали, что второй уникальный компонент представляет собой

струи вещества, вылетающую с огромной скоростью из центрального компактного источника. Такие мощные выбросы называются релятивистскими струями. Сам центральный компактный источник отождествили с ядром галактики. На сегодня самым лучшим примером можно считать гигантскую эллиптическую галактику M87 (обнаружена в 1781 г. французским астрономом Шарлем Мессье как туманный объект, а в 1918 г. американский астроном Гебер Кертис заметил наличие прямого луча, связанного с ядром тонкой линией материи), которая является одной из самых массивных, с ярчайшим источником радио-

излучения (рис. 1). Из ядра этой галактики вырывается огромная релятивистская струя, а в 2019 г. у было получено детальное изображение самого центра (ядра) галактики. Это самое первое в истории человечества изображение сверхмассивной черной дыры, которая находится в ядре галактики M87. На снимке, полученном коллаборацией «Телескоп горизонта событий» (Event Horizon Telescope), хорошо виден светящийся аккреционный диск вокруг центральной черной дыры (рис. 2). Но к идее о том, что она находится в центре активного ядра галактики, ученые пришли задолго до начала работы «Телескопа горизонта событий».

Сам термин «черная дыра» был популяризован и введен в научный обиход известным американским физиком-теоретиком

Дж.А. Уилером в его популярной лекции «Наша Вселенная: известное и неизвестное» в 1967 г., когда ученые серьезно дискутировали о самой возможности реального их существования и возможных механизмах рождения. В те годы было принято говорить о звездах, поэтому в 1963 г. вышла работа американских астрофизиков Ф. Хойла и У. Фаулера, где они обсуждали идею существования сверхмассивной звезды массой порядка миллиарда солнечных масс, способной быть источником гравитационной и термоядерной энергии, ускорять частицы до релятивистских скоростей и создавать потоки вещества, выбрасываемые со скоростью в несколько тысяч километров в секунду. Ученые предположили, что магнитное поле может наматываться между центральной звездой и окружающим ее аккреционным диском, хранить большое количество энергии, что приводит к мощным взрывам и струям, подобным M87. Причем только за счет сжатия огромной массы сверхзвезды можно получить самые мощные источники космического излучения. Вскоре после этого в 1964 г. американский астрофизик Э. Солпитер и советский ученый Я. Зельдович выдвинули идею производства энергии за счет аккреции (падения) вещества на сверхмассивную звезду. Важно отметить, что гипотеза о ее существовании не имела серьезных теоретических оснований, поскольку



Рис. 1. Галактика M87. Из центра галактики вырывается релятивистская струя
Источник: NASA and The Hubble Heritage Team

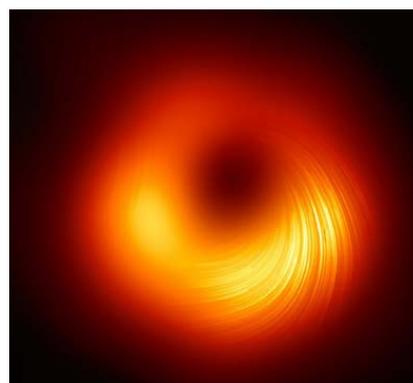


Рис. 2. Сверхмассивная черная дыра в центре галактики M87. Это самое первое в истории человечества качественное изображение тени черной дыры
Источник: Event Horizon Telescope, <https://www.eso.org>.

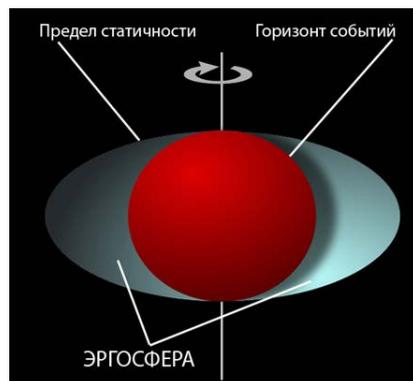


Рис. 3. Структура вращающейся черной дыры
Источник: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Эргосфера>

такие огромные звезды будут очень неустойчивыми. В итоге от идеи отказались.

Наконец, в 1969 г. английский астрофизик Д. Линден-Белл заявил, что мертвые квазары в форме «коллапсировавших тел» (то есть черных дыр) должны быть обычным явлением в ядрах галактик, учитывая энерговыделение первых за время жизни и их распространенность в более ранние периоды истории Вселенной. Линден-Белл исследовал тепловое излучение и выброс быстрых частиц из аккреционного диска, вращающегося вокруг черной дыры, что связано с диссипацией энергии из-за магнитных и турбулентных процессов. Для мощности излучения типичных квазаров аккреционный диск должен иметь максимальную эффективную температуру порядка 100 тыс. градусов Цельсия, что может приводить к фотоионизации и излучению в широких линиях. Исследователь отметил, что при различных значениях массы черной дыры и темпа аккреции эти диски способны дать объяснение значительной части явлений астрофизики высоких энергий, включая ядра галактик, сейфертовские галактики, квазары и космические лучи. Здесь стоит отметить, что Линден-Белл рассматривал невращающуюся, статическую черную дыру, или черную дыру Шварцшильда.

В этом же году вышла работа британского физика и математика Р. Пенроуза (лауреат Нобелевской премии по физике 2020 г. за открытие постулата о том, что образование черных дыр неизбежно следует из общей теории относительности), где были исследованы

свойства вращающейся черной дыры Керра. Ученый описал ее новое необычное свойство, а именно наличие отрицательных энергетических состояний у частиц, движущихся против направления вращения самой черной дыры, и предложил процесс, с помощью которого можно извлечь энергию из вращающейся черной дыры, (рис. 3), что стало революционной идеей. Собственно черная дыра обычно отождествляется с горизонтом событий (поверхность, через которую можно беспрепятственно войти внутрь, но выйти уже невозможно), окруженной еще одной поверхностью, называемой пределом статичности (куда всегда можно войти и выйти обратно). Область между ними – эргосфера, особенность которой состоит в том, что внутри нее пространство как бы закручивается и находится в постоянном вращении. Это означает, что любая материя, попадающая в эргосферу, автоматически начнет вращаться. При этом участок вне поверхности предела статичности не вращается. Пенроуз сделал наглядную иллюстрацию (рис. 4), на которой показано, что люди построили некую станцию вокруг вращающейся черной дыры и на веревках спускают вещество прямо в эргосферу, чтобы получить энергию. Ученый подчеркивал, что при этом будет уменьшаться скорость вращения черной дыры, а значит, извлекаться энергия. Кроме этой ироничной картинке никаких расчетов в статье не приводилось. Конкретное числовое выражение было представлено годом позже, и оно показывало, что одна частица падает в эргосферу и там распадается на две другие (рис. 5), при этом вторая

должна лететь прямо в черную дыру против направления ее вращения, вследствие чего будет иметь отрицательную энергию. Третья частица улетает из эргосферы с положительной энергией, которая больше энергии исходной частицы. Оказалось, что в этом примере эффективность процесса извлечения энергии очень низкая. Затем следовало утверждение о

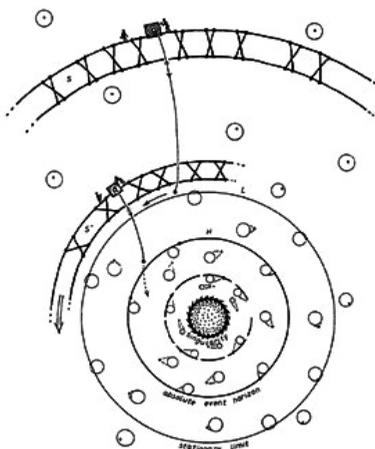


Рис. 4. Иллюстрация извлечения энергии из черной дыры, сделанная Роджером Пенроузом

Источник: Rivista del Nuovo Cimento, Numero Speciale I, 257 (1969)

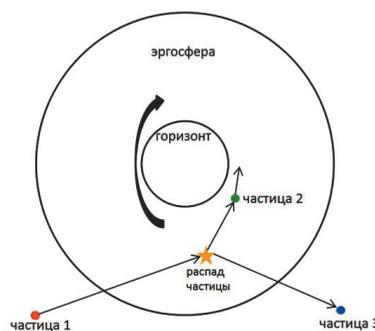


Рис. 5. Схема процесса Пенроуза. Частица 1 летит в эргосферу и там распадается на две другие частицы. Частица 2 попадает под горизонт черной дыры, а частица 3 улетает обратно. Энергия частицы 2 отрицательна, поэтому энергии частицы 3 больше, чем энергии частицы 1

Источник: автор статьи

том, что КПД для такого механического процесса не превышает 20%, а сами частицы, которые уносят энергию из черной дыры, не могут быть ускорены до релятивистских скоростей. Таким образом, в первой половине 1970-х гг. сформировалось мнение, что механический процесс Пенроуза хоть и возможен в принципе, но для описания энерговыделения в реальных астрофизических объектах не годится.

Прорыв произошел в 1977 г., когда британский астрофизик Р. Блэндфорд вместе со своим аспирантом Р. Знайеком опубликовали статью об электромагнитном механизме извлечения энергии из вращающейся черной дыры, который получил их имена – Блэндфорда – Знайека. Известный американский астрофизик и нобелевский лауреат по физике К. Торн писал об этом так: «...этот механизм является одним из лучших объяснений источника энергии, который питает квазары». Блэндфорд и Знайек использовали аналогию с радиопульсаром, моделью которого считалась вращающаяся замагниченная нейтронная звезда (рис. 6). Ее вращение служит источником энергии радиопульсара. Механизм процесса связан с работой униполярного индуктора, который можно пояснить на следующем примере. Если к вращающемуся замагниченному шару присоединить два скользящих контакта, соединенных неподвижным проводом, то по нему потечет ток, который будет отводить энергию от источника (то есть вращающегося шара) к внешней нагрузке, где и будет выделяться энергия. Замедление вращения шара связано

с поверхностными токами, которые должны появиться для замыкания всей цепи. В отличие от нейтронной звезды черная дыра не имеет своего собственного магнитного поля. Тем не менее можно говорить о ее магнитосфере, поскольку большая часть материи, находящейся в аккреционном диске черной дыры, будет иметь проходящие через нее линии магнитного поля (рис. 7). При попадании вещества в черную дыру магнитные линии увлекаются вместе с ним, становясь все более и более плотно упакованными по мере приближения к ней. Во вращающейся черной дыре само пространство движется, как вода в водовороте,

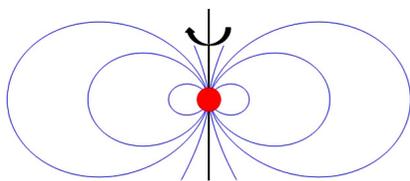


Рис. 6. Схема магнитосферы нейтронной звезды. Магнитные линии показаны синим цветом. Они выходят из одного полюса и замыкаются на противоположном; (звезда обозначена красным цветом)
Источник: автор статьи

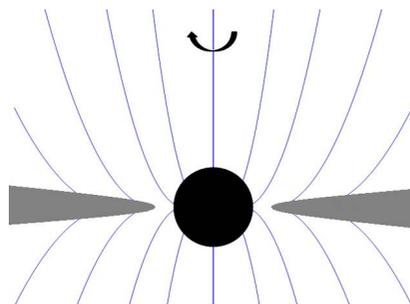


Рис. 7. Схема магнитосферы черной дыры. Магнитные линии (показаны синим цветом) пронизывают черную дыру в центре, а также примыкающий к ней аккреционный диск (показан серым цветом)
Источник: автор статьи

и магнитные силовые линии тоже будут тянуться, скручиваясь и скручиваясь, как веревка. Систему, состоящую из них и горячей плазмы из падающего вещества, можно рассматривать как электрическую цепь. Токи текут вдоль силовых линий к полюсам черной дыры, по «поверхности» горизонта событий и за его пределы вблизи экватора. На некотором расстоянии от черной дыры этот ток сбрасывает свою энергию в плазму, которая выдувается в виде огромных струй из полюсов черной дыры. Это делает ее генератором напряжения, магнитное поле – линиями проводов, а плазма есть нагрузка в цепи. Конечно, электрические заряды на самом деле не могут течь через горизонт событий, это описание полезно только для того, чтобы понять, как магнетизм, электричество и плазма ведут себя за пределами черной дыры. Механизм замедления ее вращения связан не с поверхностными токами, как в случае с нейтронной звездой, а с «движением пространства» в эргосфере черной дыры. Как в механическом процессе Пенроуза необходимо наличие частиц с отрицательной энергией, так и в процессе Блэндрфорда – Знайека энергия электромагнитного поля, пересекающего горизонт событий, является отрицательной.

Остается обсудить вопрос о запасе энергии черной дыры. Согласно знаменитой формуле Эйнштейна $E = mc^2$, энергия есть масса, умноженная на

квадрат скорости света. Получается, что энергия сверхмассивной черной дыры практически бесконечна. Но какая ее часть относится к вращательной? Ответ на этот вопрос был получен в 1970 г. в работе греческого астрофизика Д. Кристодулу (в те годы был аспирантом Д. Уиллера), выведшего формулу, из которой следовало, что полная энергия черной дыры состоит из вращательной энергии и так называемой неприводимой (которую нельзя уменьшить). То есть в процессе извлечения вращательной энергии из черной дыры будет уменьшаться ее полная энергия вместе с вращательной, но неприводимая при этом будет возрастать либо может остаться без изменений. Предположим идеальный вариант, при котором процесс извлечения энергии происходит без увеличения неприводимой ее части. Вначале черная дыра имеет максимальную скорость вращения, определяемую ее начальной массой. Добывать энергию можно до тех пор, пока черная дыра полностью не остановится, то есть не станет статической. Тогда из формулы Кристодулу следует, что величина максимально возможной полученной энергии будет составлять 29% от начальной энергии черной дыры, то есть треть.

Если взять квазар с мощностью излучения в миллиард мощностей Солнца, который питает сверхмассивная черная дыра с массой в миллиард солнечных масс, то светить он будет еще тысячи миллиардов лет. ■

АНОНС

Обзор «Первичные черные дыры» Александра Долгова, доктора физико-математических наук, профессора Новосибирского университета и заведующего лабораторией теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований будет опубликован в № 5 журнала «Наука и инновации».