

# содержание

ФЕВРАЛЬ 2010

## ГЛАВНЫЕ ТЕМЫ НОМЕРА:



- 18** **АСТРОНОМИЯ**  
**ПОРТРЕТ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ**  
Эвери Бродерик и Абрахам Лоеб  
*С помощью всемирной сети телескопов астрономы скоро впервые смогут увидеть темный силуэт черной дыры*
- 26** **ИННОВАЦИИ**  
**ИДЕИ, ИЗМЕНЯЮЩИЕ МИР**  
*20 путей к построению более чистого, здорового и рационального мира*
- 36** **ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ**  
**К ИСТОКАМ ЖИЗНИ**  
Александр Брэдли  
*Исследования недавно открытой экосистемы океанических горячих источников могут пролить свет на происхождение жизни*
- 42** **ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА**  
**МЕТАН: РАСТУЩАЯ УГРОЗА**  
Кэти Уолтер Энтони  
*Таяние арктической вечной мерзлоты создает озера, выделяющие метан. Насколько велика эта опасность, и как можно ей противодействовать?*
- 52** **АРХЕОЛОГИЯ**  
**СЕКРЕТЫ ДРЕВНЕГО КАЛЬКУЛЯТОРА**  
Тони Фрит  
*Новые исследования позволили понять, каким образом антикитерский механизм моделировал движение Луны, предсказывал затмения и делал другие сложные вещи*
- 60** **ОЧЕВИДНОЕ — НЕВЕРОЯТНОЕ**  
**СОКРОВИЩА ЕГИПТА**  
По материалам беседы с Галиной Беловой и Сергеем Ивановым  
*С древних времен верховные жрецы использовали гробницы как место, где можно спрятать от разграбления и разрушения мумии великих фараонов, их жен, ближайших родственников и верных слуг*
- МЕДИЦИНА**  
**ДВОЙНАЯ ЖИЗНЬ МОЛЕКУЛЫ АТФ**  
Джеффри Бернсток и Балджит Как  
*Молекула АТФ, основной «поставщик» энергии в клетке, выполняет также роль посредника в межклеточном общении*

Учредитель и издатель:	ЗАО «В мире науки»
Главный редактор:	С.П. Капица
Заместители главного редактора:	А.Ю. Мостинская О.И. Стрельцова
Зав. отделом естественных наук:	В.Д. Ардаматская
Зав. отделом российских исследований:	Ю.Г. Юшквичюте
Зав. отделом фундаментальных исследований:	Е.В. Кокурина
Выпускающий редактор:	М.А. Янушкевич
Корреспондент:	Д.А. Мисюров
Над номером работали:	Н.Н. Алипов, А.Н. Божко, А.А. Гендин, Ф.С. Капица, И.Е. Сацевич, В.Г. Сурдин, А.Н. Устинов, П.Ю. Худoley, Н.Н. Шафрановская
Научные консультанты:	директор Центра египтологических исследований Российской академии наук Г.А. Белова, заместитель председателя Правительства Российской Федерации А.Д. Жуков, кандидат исторических наук С.В. Иванов
Арт-директор:	Л.П. Рочева
Корректурa:	Я.Т. Лебедева
Секретарь:	И.И. Сорина
Генеральный директор ЗАО «В мире науки»:	О.А. Василенко
Главный бухгалтер:	Н.М. Воронина
Отдел распространения, подписка:	Л.Р. Исмагилова Ю.С. Федорова
Веб-сайт:	А.П. Цыганков

Адрес редакции и издателя:  
105005, Москва, ул. Радио, д. 22, к. 409  
Телефон: (495) 727-35-30, тел./факс: (495) 925-03-72  
e-mail: info@sciam.ru; www.sciam.ru

Иллюстрации предоставлены Scientific American, Inc.  
В верстке использованы шрифты Helios и Bookman C

Отпечатано:  
ООО ИД «Медиа-Пресса», 127147, Москва, ул. Правды, д. 24.  
Заказ № 10-01-00111

## © В МИРЕ НАУКИ

Журнал зарегистрирован в Комитете РФ по печати.  
Свидетельство ПИ №ФС77-19285 от 30.12.2004

ЗАО «В мире науки» входит в состав Гильдии издателей  
периодической печати

Тираж: 12 500 экземпляров  
Цена договорная.

Перепечатка текстов и иллюстраций только с письменного согласия  
редакции. При цитировании ссылка на «В мире науки» обязательна.  
Редакция не всегда разделяет точку зрения авторов и не несет  
ответственности за содержание рекламных материалов. Рукописи  
не рецензируются и не возвращаются.

## SCIENTIFIC AMERICAN

ESTABLISHED 1845

Acting editor in chief:	Mariette DiChristina
Editors:	Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fichetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
Chief news editor:	Philip M. Yam
Senior writer:	Gary Stix
Contributing editors:	Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
Art director:	Edward Bell
President:	Steven Inchcoombe
Vice president, operations and administration:	Frances Newburg
Vice president, finance and business development:	Michael Florek
Vice president and publisher:	Bruce Brandton

© 2007 by Scientific American, Inc.

Торговая марка Scientific American, ее текст и шрифтовое оформление  
являются исключительной собственностью Scientific American, Inc.  
и использованы здесь в соответствии с лицензионным договором

76

## МИКРОСКОПИЯ В СТРАНЕ ЛИЛИПУТОВ

Гэри Стикс

*Снимки, сделанные с использованием светового  
микроскопа, представляют мир природы под  
необычным углом зрения*

82

## АВТОМОБИЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕЕ АВТОМОБИЛЕЙ

Лидеры отрасли ищут путь вперед

## РАЗДЕЛЫ:

ОТ РЕДАКЦИИ

3

РАЗЫСКИВАЮТСЯ ГЕНИАЛЬНЫЕ ИДЕИ

4

50, 100, 150 ЛЕТ ТОМУ НАЗАД

6

СОБЫТИЯ, ФАКТЫ, КОММЕНТАРИИ

- Легко найти, легко потерять
- Положение монополей
- Как прорваться сквозь плазму
- Отрицание «Климатгейта»
- Спешите делать добро!
- Диабет и воспаление

12

## АКТУАЛЬНО ДЕМОГРАФИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ И БУДУЩЕЕ РОССИИ

По материалам беседы с Александром Жуковым

*Чем характеризуется демографическая ситуация  
в России? Что ждет страну в 2015 г.? Какие цели  
и задачи в демографической политике нашего  
государства становятся сегодня определяющими?*

90

## ЛАБОРАТОРИЯ ВКУСА ИТАЛЬЯНСКОЕ СЧАСТЬЕ: ПАСТА

Анатолий Гендин

*Приятно сознавать, что наши легендарные макароны  
по-флотски, символ кулинарной простоты  
и гастрономической непритязательности, на самом  
деле не такие уж далекие родственники знаменитой  
итальянской пасты*

86

## ОБЗОРЫ:

ФОРУМЫ, ПРЕМИИ, ВЫСТАВКИ

94

СПРОСИТЕ ЭКСПЕРТОВ

Эвери Бродерик и Абрахам Лоеб

# портрет ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

С помощью всемирной сети телескопов астрономы скоро впервые смогут увидеть темный силуэт черной дыры

Возможно, вы видели телевизионную рекламу, в которой телефонный мастер уходит все дальше и дальше, спрашивая в трубку: «Вы меня слышите?». А теперь представим, что этот мастер дошел до центра нашей Галактики, где скрыта массивная черная дыра Стрелец А\* (Sgr A\*), в 4,5 млн раз более массивная, чем Солнце. Когда мастер приблизится к черной дыре на расстояние менее 10 млн километров, мы заметим, что его голос понижается и постепенно исчезает, превращаясь в монотонный шепот по мере затухания сигнала. Если бы мы могли его видеть, то заметили бы, что изображение мастера становится все краснее и тусклее, как будто бы застывая во времени вблизи границы черной дыры, называемой горизонтом событий.

Однако сам мастер не заметил бы замедления времени и не увидел бы ничего необычного вблизи горизон-

та событий. Он узнал бы, что пересекает этот горизонт только тогда, когда услышал бы от нас: «Нет, мы почти не слышим вас!» Но у него уже не будет возможности поделиться с нами своими последними впечатлениями: ничто и никто не может преодолеть гравитационное притяжение и выйти из-под горизонта событий. Через минуту после пересечения объектом горизонта гравитационные силы внутри черной дыры разорвут его на части.

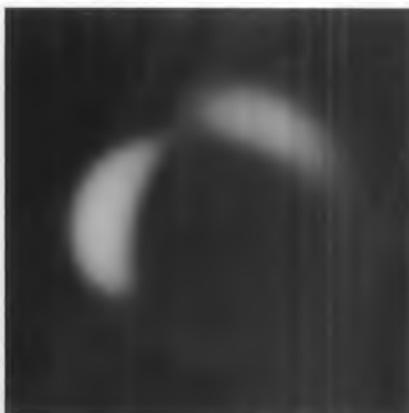
В реальной жизни мы не можем отправить мастера в такое путешествие. Но астрономы разработали технику, которая вскоре позволит впервые получить изображение темного силуэта черной дыры на фоне горячего сияющего газа.

«Постойте! — скажете вы. — Разве астрономы не сообщали о многочисленных наблюдениях черных дыр, демонстрируя их изображения?» Верно, сообщали. Но на тех изображениях был газ или другое вещес-

тво вблизи черной дыры, сама же она оставалась невидимой точкой внутри. Иногда это были колоссальные выбросы энергии, источником которой считалась черная дыра. По правде говоря, мы даже не до конца уверены в существовании черных дыр (см.: Барцело К., Виссер М., Либерати С., Сонега С. Черные звезды, а не дыры // ВМН. № 12, 2009).

Астрономы обнаружили в космосе настолько массивные и компактные объекты, что если общая теория относительности Эйнштейна верна, они должны быть черными дырами. Поэтому о них принято говорить как о реальных черных дырах (что мы и делаем в этой статье). Но до сих пор нельзя сказать, обладают ли эти объекты главным признаком черной дыры — горизонтом, через который вещество может двигаться только в одну сторону. И это отнюдь не праздное любопытство: ведь горизонты черных дыр представляют





собой одну из самых сложных задач теоретической физики. Изображения их темных силуэтов помогут нам понять необычные астрофизические процессы, происходящие рядом с ними.

### Вопросы перемещения

Горизонты событий привлекают всеобщий интерес, поскольку демонстрируют глубинное противоречие между двумя великими достижениями физики XX в. — квантовой механикой и общей теорией относительности. Важнейшее свойство квантовомеханического описания физических систем — обратимость времени. Каждому квантовому процессу соответствует обратный процесс, который в принципе можно использовать для восстановления любой информации, искаженной прямым процессом. В то же время общая теория относительности (ОТО), представляющая гравитацию как результат искривления пространства и предсказывающая существование черных дыр, не допускает обратных процессов, способных вернуть то, что «упало» в черную дыру. Желание разрешить

это противоречие между квантовой механикой и гравитацией заставило специалистов по теории струн взяться за разработку квантовой теории гравитации — теории, которая смогла бы показать, как свойства гравитации вытекают из законов квантовой механики.

Проще говоря, физики хотят понять, является ли общая теория относительности Эйнштейна правильной теорией гравитации даже в тех случаях, когда предсказывает эффекты, принципиально отличающиеся от классической теории Ньютона, — такие как существование горизонта событий. У черных дыр есть два замечательных качества — они описываются чрезвычайно простым решением уравнений гравитации Эйнштейна (черную дыру полностью определяют всего три параметра: масса, электрический заряд и спин), и при этом свойства их гравитации, согласно ОТО, существенно отличаются от того, что прогнозирует теория Ньютона. Таким образом, черные дыры — это как раз те места, где нужно искать свидетельства отклонения от уравнений Эйнштейна в экстремальных

условиях, которые могут дать ключ к созданию квантовой теории гравитации. И наоборот, успешная проверка этих уравнений вблизи черных дыр сможет существенно расширить область применения общей теории относительности.

К тому же астрофизикам не дает покоя вопрос, что происходит в окрестности черных дыр, которые питаются падающим на них по спирали веществом — газом и пылью. Приближаясь к горизонту событий, это вещество выделяет гигантскую энергию, производя тепло в 20 раз эффективнее, чем при ядерном синтезе, что ненамного меньше наиболее мощного среди известных генераторов энергии. Излучение горячего вращающегося газа делает среду вблизи черных дыр самым ярким объектом во Вселенной.

Астрофизики смогли смоделировать аккрецию вещества до некоторого расстояния, но неясно, как газ в аккреционном потоке перемещается с удаленной орбиты на более близкую к горизонту, и как он в конце концов попадает в черную дыру. Магнитные поля, созданные заряженными частицами, движущимися в аккреционном потоке, должны играть важную роль в его поведении. Пока мы очень мало знаем о структуре этих полей и о том, как эти структуры влияют на наблюдаемые характеристики черных дыр. Хотя компьютерное моделирование всей области аккреции уже становится возможным, нам, теоретикам, еще далеко до полноценных вычислений *ab initio*. Новые данные наблюдений станут важнейшим стимулом для рождения новых идей и решающим аргументом в соревновании разных моделей.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Черные дыры — одни из наиболее загадочных объектов Вселенной. До сих пор астрономы могли фиксировать их только опосредованно: по гравитационному воздействию на окружающие их звезды и по излучению горячего газа, обращающегося вокруг черных дыр.
- Астрономы организуют сеть радиотелескопов, чтобы получить изображения сверхмассивных черных дыр, расположенных в ядрах нашей Галактики и галактики M87.
- Детальное исследование черных дыр не только поможет объяснить вызванные ими удивительные явления, но и позволит проверить общую теорию относительности Эйнштейна и уточнить свойства гравитации в экстремальных условиях.

Зловеще мрачный диск черной дыры в центре нашей Галактики и горячий газ, захваченный ее притяжением, возможно, будут выглядеть как эта компьютерная симуляция (слева), когда сеть радиотелескопов начнет наблюдения в этом году. Правда, рассеяние лучей в межзвездном газе размывает тонкие детали изображения (вверху)

Сильнее всего астрофизиков смущает неясность происхождения тонких и длинных выбросов (джетов) у черных дыр. Каким-то образом силы вблизи сверхмассивной черной дыры аккумулируются для извержения вещества с ультрарелятивистскими скоростями (до 99,98% скорости света). Эти удивительные потоки простираются на расстояния, превышающие размер галактики. Образуясь вблизи черной дыры в виде мощного и узко сфокусированного пучка, они могут пронизать Солнечную систему, как ушко галактической иглы. Мы не знаем, что именно разгоняет джеты до таких скоростей, и даже из чего они состоят: из электронов и протонов, или из электронов и позитронов, или же это в основном электромагнитные поля? Для ответа на эти и другие вопросы астрономам необходимы прямые наблюдения газа вблизи черных дыр.

## Выслеживание чудовища издалека

К сожалению, такие наблюдения очень трудны по нескольким причинам. Во-первых, черные дыры очень малы для любых астрономических измерений. Вероятно, они делятся на две основные группы: дыры со звездными массами, обычно от 5 до 15 солнечных масс (это остатки угасших массивных звезд), и сверхмассивные дыры, расположенные в центрах галактик и имеющие массы до 10 млрд солнечных масс. При массе черной дыры в 15 солнечных масс ее горизонт событий должен иметь диаметр около 90 км — слишком мало, чтобы разглядеть его на межзвездном расстоянии. Но даже монстр с массой

## ЛОГОВО МОНСТРА

Определяющее свойство черной дыры — наличие у нее горизонта событий, сферической границы области, из которой ничто не может выйти наружу из-за непреодолимой гравитации. Аккреция газа на черную дыру происходит в окружающем ее горячем диске с возникающими яркими пятнами, похожими на солнечные вспышки. Диск может быть тонким, как на рисунке, но может и заполнять большой угол над и под плоскостью вращения и простираться очень далеко. Многие сверхмассивные черные дыры испускают яркие джеты почти со скоростью света.

Вероятно, внутренний край аккреционного диска находится вблизи последней устойчивой круговой орбиты. Вещество, подошедшее к черной дыре еще ближе, окажется на неустойчивой орбите и быстро упадет в дыру. На орбите фотона луч света, в принципе, может обращаться вокруг черной дыры вечно, но на практике малейшее возмущение заставит его двигаться внутрь или наружу

Сверхмассивная черная дыра



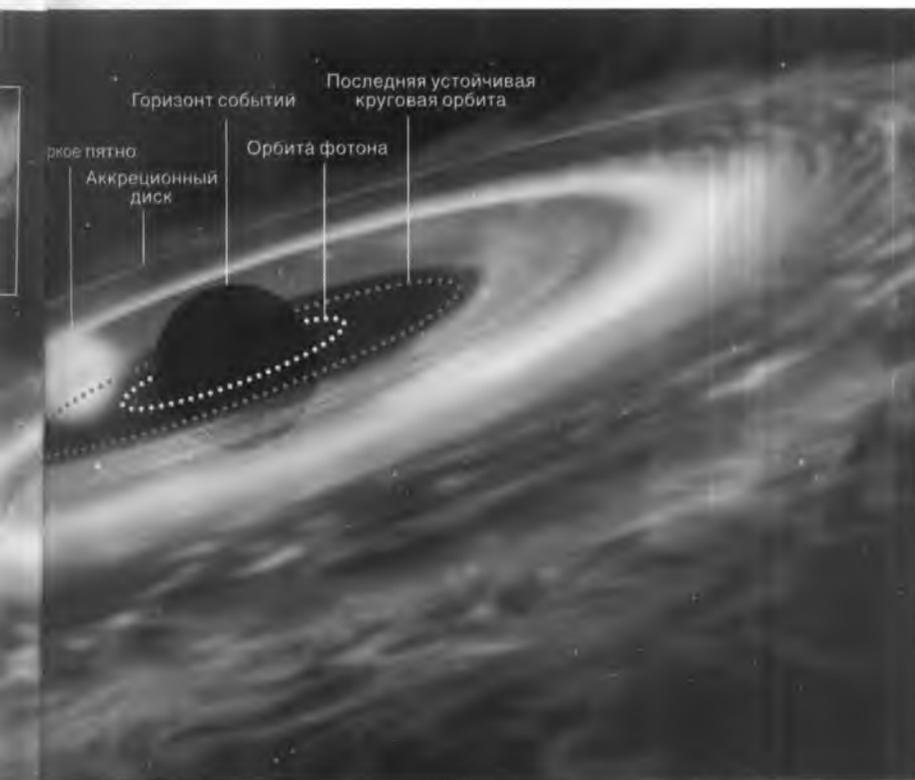
в миллиард солнечных масс легко поместится в орбите Нептуна!

Во-вторых, маленький размер и сильная гравитация черных дыр приводят к очень быстрому движению рядом с ними. Вещество вблизи черной дыры звездной массы совершает оборот вокруг нее менее чем за микросекунду. Поэтому требуются очень чувствительные приборы для наблюдения столь быстрых явлений. Наконец, лишь малая доля черных дыр имеет рядом с собой источники газа, аккреция которого позволяет увидеть их; подавляющее большинство черных дыр в Галактике еще не обнаружено.

Для преодоления этих трудностей астрономы разработали различные методики, которые даже без наличия прямых изображений позволяют получать информацию о свойствах и поведении вещества, обращающегося вблизи подозреваемой черной дыры. Например, астрономы могут «взвесить» сверхмассивную черную дыру, наблюдая ближайшие к ней звезды, подобно тому как по движению планет измеряют массу Солнца. В далеких галактиках невозможно увидеть отдельные звезды вблизи сверхмассивной звезды, но спектры показывают распределение скоростей этих звезд, что дает нам массу черной дыры. Сверхмассивная черная дыра Sgr A\* в центре Галактики настолько близка к нам, что в телескоп видны отдельные близкие к ней звезды, поэтому ее масса измерена сейчас точнее любой другой. К сожалению, эти звезды находятся далеко за пределом наиболее интересной для нас области, где эффекты общей теории относительности становятся существенными.

## ОБ АВТОРАХ

**Эвери Бродерик** (Avery E. Broderick) и **Абрахам Лоеб** (Abraham Loeb) начали сотрудничество с 2005 г. в Институте теории и вычислений (Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр), которым ныне руководит Лоеб. Сейчас Бродерик — старший научный сотрудник в Канадском институте теоретической астрофизики (Университет Торонто). Он первым стал пропагандировать идею получения изображений вблизи горизонтов сверхмассивных черных дыр. Лоеб — профессор астрономии Вейцмановского института (Реховот, Израиль). Он теоретически исследовал звезды первого поколения, сверхмассивные черные дыры и гамма-вспышки.



ся наподобие ряби по поверхности пруда. Эту «рябь» пространства-времени можно зафиксировать на далеком расстоянии, но для этого требуется невероятно чувствительная аппаратура. Хотя уже существующие обсерватории пока не зафиксировали гравитационных волн, данный метод открывает совершенно новый путь для изучения черных дыр.

### Окно с обзором

Несмотря на обилие информации, ни один из вышеописанных методов не может дать изображения горизонта событий черной дыры. Впрочем, благодаря новым технологиям это скоро станет возможным. Черная дыра, изображение которой будет получено, — это Sgr A\*, чудовище, обитающее по соседству с нами. Удаленная всего на 24 тыс. световых лет, Sgr A\* занимает на небе самую большую площадь среди всех известных черных дыр. Например, черная дыра с массой, равной десяти массам Солнца, чтобы выглядеть такой же большой, должна быть к нам в 100 раз ближе, чем ближайшая звезда. Хотя существуют сверхмассивные черные дыры гораздо крупнее Sgr A\*, они удалены от нас на миллионы световых лет.

Видимый размер темного силуэта далекой черной дыры увеличивается более чем вдвое из-за искривления световых лучей ее гравитацией. Но и при этом горизонт Sgr A\* виден нам под углом не больше 55 микросекунд дуги. Так выглядит маковое зернышко в Лос-Анджелесе, если смотреть на него из Нью-Йорка.

Угловое разрешение любого современного телескопа, каким бы впечатляющим оно ни было, ограничено дифракцией — эффектом волновой оптики, возникающим при прохождении света сквозь входное отверстие телескопа, имеющее конечный размер. Минимальный угол, который способен разрешить телескоп, можно уменьшить, если увеличить размер телескопа или наблюдать на более коротких волнах. При наблюдении в инфра-

Эффекты ОТО астрономы пытаются обнаружить и в том, как излучение вблизи черной дыры меняется со временем. Например, рентгеновское излучение некоторых черных дыр звездной массы довольно регулярно пульсирует с характерным временем, близким к орбитальному периоду, ожидаемому на внутреннем крае аккреционного диска.

Но, пожалуй, наиболее плодотворный метод исследования сверхмассивных черных дыр связан с флуоресценцией атомов железа на поверхности аккреционного диска. Быстрое вращение этого диска, содержащего атомы железа, а также сильная гравитация черной дыры вызывают сдвиг характерной длины волны флуоресценции, распределяя ее по широкому диапазону длин волн. Вблизи быстро вращающейся черной дыры аккреционный диск тоже вращается быстрее (это эффект ОТО — вращение черной дыры закручивает пространство вокруг нее), поэтому линия излучения приобретает характерную асимметрию. Японские спутники

ASCA и *Suzaku* наблюдали как раз такие излучения — астрономы интерпретировали их как свидетельство быстрого вращения черных дыр, скорость вращения аккреционных дисков у которых достигает одной трети скорости света.

Данные о том, насколько быстро вращаются черные дыры звездной массы, получены при наблюдении двойных систем, в которых черная дыра и обычная звезда обращаются друг вокруг друга настолько тесно, что черная дыра медленно пожирает своего соседа. Анализ рентгеновских спектров и орбитальных параметров таких систем показывает, что скорость вращения дыр составляет от 65 до 100% от максимального значения, допустимого ОТО для дыр данной массы. Видимо, очень быстрое вращение — это норма.

Черные дыры испускают не только излучение (в диапазоне от радио до рентгена) и высокоэнергичные джеты. Когда две черные дыры сталкиваются, они возмущают структуру окружающего пространства-времени, вызывая гравитационные волны, которые разбегаются

## ДАЛЕКИЕ ПРИЗНАКИ ЧЕРНЫХ ДЫР

Астрофизики считают, что хотя черные дыры слишком малы и далеки, чтобы их заметить, все же именно они ответственны за многие наблюдаемые явления: от рентгеновского излучения до огромных джетов, извергаемых из центров галактик



На рентгеновском изображении галактики Кентавр А, полученном со спутника «Чандра», виден джет длиной 13 тыс. световых лет, источником которого, вероятно, служит сверхмассивная черная дыра. Светлые точки — это черные дыры звездной массы, поглощающие газ звездных компаньонов. Красный, зеленый и голубой указывают три рентгеновских диапазона



Сверхмассивная черная дыра, судя по всему, находящаяся в центре галактики M87, окружена пузырями газа размером 15 тыс. световых лет и выбрасывает ультрарелятивистский джет в нашу сторону. Возможно, второй, невидимый джет уносит вещество в противоположном направлении. Это изображение получено системой радиотелескопов VLA в Нью-Мексико на волне длиной 2 см. Цветом показана интенсивность сигнала

красных лучах (которые не боятся пылевых облаков, скрывающих Sgr A\* в оптическом диапазоне) для разрешения угла в 55 мкс дуги понадобился бы телескоп диаметром 7 км. Более короткие волны опти-

ческого и ультрафиолетового диапазонов должны уменьшить размер этого гиганта, но не существенно. Если же рассматривать длинные радиоволны, например миллиметровые, то для них нужен телескоп диаметром 5 тыс. км. К счастью, такие радиотелескопы размером с земной шар уже есть.

При помощи метода, называемого интерферометрией со сверхдлинной базой (*Very Long Baseline Interferometry, VLBI*), объединяют сигналы, зарегистрированные сетью радиотелескопов, разбросанных по всей планете, чтобы добиться углового разрешения, которое мог бы иметь только телескоп размером с Землю. Две такие системы телескопов работают уже более десяти лет: это Решетка со сверхдлинной базой (*Very Long Baseline Array, VLBA*) с антеннами в США — от Гавайев и Нью-Гэмпшира, а также Европейская VLBI-сеть (*European VLBI Network, EVN*) с антеннами в Китае, Южной Африке, на о. Пуэрто-Рико и, разумеется, в Европе. В фильмах «Контакт» и «2010» вы могли видеть систему значительно меньшего размера — Очень большую решетку (*Very Large Array*) в Нью-Мексико.

К сожалению, VLBA и EVN работают на радиоволнах не короче 3,5 мм. Поэтому их разрешение не превышает 100 мкс дуги, что не позволяет различить горизонт Sgr A\*. Более того, на таких длинах волн межзвездный газ размывает изображение этой черной дыры, как густой туман заволакивает уличные фонари. Поэтому нужно усовершенствовать интерферометр для наблюдения на более коротких волнах: 1 мм и короче.

Однако на коротких волнах возникает другая проблема — поглощение лучей водяным паром в атмосфере Земли. Поэтому миллиметровые и субмиллиметровые телескопы устанавливают в наиболее высоких и сухих местах, таких как вершина Мауна-Кеа (Гавайи) и пустыня Атакама (Чили), или в Антарктике. Но даже при этом для наблюдений открывается лишь два возможных «окна» — на волнах длиной 1,3 и 0,87 мм. При базе размером

с Землю на этих волнах можно получить разрешение соответственно в 26 и 17 мкс дуги; этого достаточно чтобы различить горизонт Sgr A\*.

Уже имеются несколько миллиметровых и субмиллиметровых телескопов, которые можно объединить в такую систему, — на Гавайях, на юго-западе США, в Чили, Мексике и Европе. Но поскольку астрономы создавали эти телескопы для разных задач, то чтобы сделать из них единую систему, потребуются решить много технических проблем, включая разработку электроники с чрезвычайно низким уровнем шумов и сверхширокополосных цифровых регистраторов.

Тем не менее группа под руководством Шеперда Долемана (*Sheperd S. Doeleman*) из Массачусетского технологического института решила эту проблему в 2008 г. Эта группа исследовала Sgr A\* на волне 1,3 мм с помощью системы из трех телескопов — в Аризоне, Калифорнии и на Мауна-Кеа. Столь малое число телескопов недостаточно для получения изображения Sgr A\*, но ученым кое-что все-таки удалось. По их данным, объект имеет яркую область размером около 37 мкс дуги, т.е. две трети от размера горизонта. Использование дополнительных телескопов, возможно, позволит получить изображение темного силуэта горизонта событий.

Уже проведенные VLBI-наблюдения на миллиметровой волне показали, что Sgr A\* не может не иметь горизонта. Аккреция на черную дыру и на объект без горизонта принципиально различаются. В обоих случаях аккрецирующее вещество в процессе падения приобретает огромную энергию. Если горизонт отсутствует, энергия нагревает то место, куда падает вещество, и место начинает излучать с характерным тепловым спектром, заметным далекому наблюдателю. Но если это черная дыра, то падающее вещество может пронести любое количество энергии сквозь горизонт, который скроет ее навсегда.

В случае Sgr A\* мы можем использовать его полную светимость для

оценки потока аккрецирующего вещества. VLBI-наблюдения на миллиметровой волне строго ограничивают возможный максимальный размер внутреннего края аккреционного потока и показывают, сколько энергии должно выделиться при достижении потоком этой точки. Если у Sgr A\* нет горизонта (т.е. если это не черная дыра), то оставшаяся энергия должна высветиться, когда аккрецирующее вещество остановится, излучая главным образом в инфракрасном диапазоне. Однако, проведя тщательные наблюдения, астрономы не обнаружили признаков теплового инфракрасного излучения от Sgr A\*. Единственный способ устранить это противоречие, не привлекая горизонт, — предположить, что вещество излучает всю избыточную энергию в процессе падения, но для этого требуется невероятно высокая эффективность излучения.

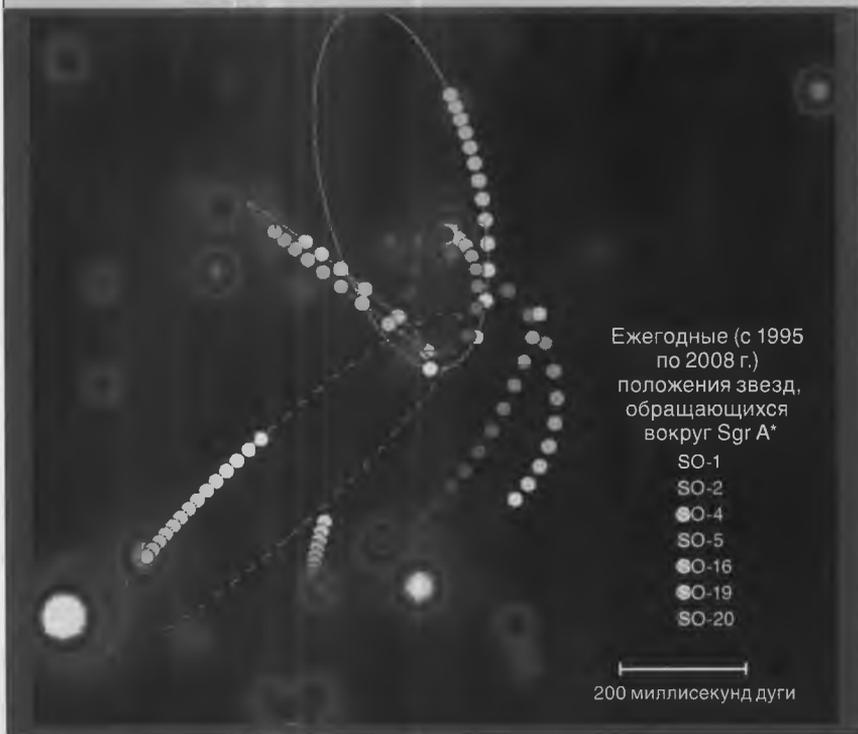
### Портрет монстра

Как и другие теоретики, мы стремились предсказать, что смогут увидеть наблюдатели, когда через несколько лет VLBI-наблюдения дадут нам изображение Sgr A\*. Вообще говоря, черная дыра оставляет свой силуэт на фоне излучения окружающего ее аккрецирующего газа. Эта «тень» возникает из-за того, что черная дыра проглатывает лучи света, идущие к наблюдателю из областей, лежащих за ней. Между тем яркая область вокруг «тени» подсвечивается и другими лучами, приходящими из-за черной дыры и едва не попадающими под горизонт. Сильное гравитационное линзирование искривляет лучи света настолько, что даже вещество, расположенное точно за черной дырой, может подсветить яркую область вокруг «тени». Получившийся силуэт можно назвать «портретом» черной дыры, и на нем она действительно черная.

Эта «тень» не будет круглым диском прежде всего из-за колоссальной орбитальной скорости газа, близкой к скорости света. Излучение столь быстро движущегося

### ХОРОВОД ВОКРУГ ГИГАНТА

До последнего времени наблюдения за движением звезд близ центра Галактики позволяли астрономам в наибольшей степени приблизиться к горизонту событий черной дыры Sgr A\*. Орбиты звезд (*прерывистые линии*) показывают, что они в плену у очень компактного объекта массой 4,5 млн масс Солнца. Цветные точки указывают ежегодное положение звезд с 1995 по 2008 г. Фоном служит инфракрасное изображение звезд в 2008 г. Звезда S0-16 ближе других подходит к Sgr A\* — на семь световых часов, но и такое расстояние в 600 раз превышает радиус горизонта событий



вещества должно иметь доплеровское смещение по частоте и концентрироваться в узком конусе в направлении движения. Это существенно увеличит яркость излучения газа на приближающейся к нам стороне орбиты и уменьшит на удаляющейся стороне. Поэтому вместо светлого кольца вокруг дискообразного темного силуэта возникнет яркий серп. Асимметрия исчезнет только в том случае, если мы будем смотреть вдоль оси вращения диска.

Подобный эффект может дать и вращение самой черной дыры, если ось ее вращения не совпадает с осью вращения диска. Поэтому такие изображения позволят астрономам определить направление вращения черной дыры и наклон к ней аккреционного диска. Эти очень важные для астрофизиков дан-

ные внесут неоценимый наблюдательный вклад в теорию аккреции и окончательно решат вопрос о плотности газа и геометрии внутреннего края аккреционного потока.

Другие сверхмассивные черные дыры тоже можно будет изучить методом VLBI, и их можно будет сравнить с Sgr A\*. Недавно мы показали, что следующим доступным для наблюдений объектом может быть черная дыра, вероятно, находящаяся в центре гигантской эллиптической галактики M87. Она расположена на расстоянии 55 млн световых лет и, по прежним оценкам астрономов, ее масса составляла около 3 млрд масс Солнца. Это означало, что размер ожидаемого силуэта должен быть чуть менее половины размера Sgr A\*. Но в июне 2008 г. Карл Гебхардт (Karl Gebhardt) из

## ФОТООХОТА НА ЧУДОВИЩЕ

Астрономы создали несколько систем радиотелескопов, образующих глобальную сеть обсерваторий (справа), которая может наблюдать Sgr A\* и его ближайшее окружение на волнах 0,87 и 1,3 мм — в двух «окнах», где нет сильного поглощения в земной атмосфере или рассеяния в межзвездном газе. Размер этой сети позволяет наблюдать с разрешением, достаточным для получения изображения горизонта событий Sgr A\*.

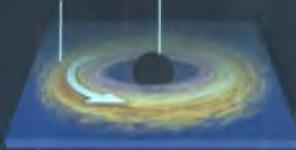
Вид Sgr A\* может дать сведения об ориентации аккреционного диска вокруг черной дыры и о скорости вращения самой дыры. Это два важнейших факта, которые можно узнать об объекте Sgr A\*, они необходимы для понимания всего того, что уже известно о нем (внизу). В случае, если в аккреционном диске вспыхивают яркие пятна, эффект гравитационного линзирования от притяжения к дыре даст побочные изображения пятна (илл. на *следующей* стр.). Если эти изображения удастся разрешить, мы получим детальную информацию о гравитационном поле вблизи черной дыры, и это будет жестким тестом для общей теории относительности



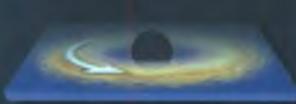
## СБОР ДАННЫХ

Объединенная система для исследований в миллиметровом диапазоне (Combined Array for Research in Millimeter-Wave Astronomy, CARMA) находится в Сидар-Флэт в Калифорнии и представляет собой одну из нескольких систем радиотелескопов, разработанных для наблюдения горизонта событий Sgr A\*. Сеть таких обсерваторий (слева), разделенных тысячами километров (линии), можно использовать для получения изображений методом интерферометрии со сверхдлинной базой, дающим такое высокое разрешение, которое имел бы радиотелескоп размером с Землю. Четыре системы (зеленый) уже готовы для совместного использования, две (розовый) пока готовятся к этой работе, а последнюю (голубой) нужно лишь приспособить для наблюдений в субмиллиметровом диапазоне

Аккреционный диск      Горизонт событий



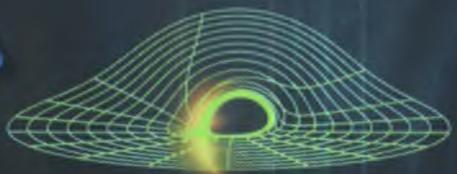
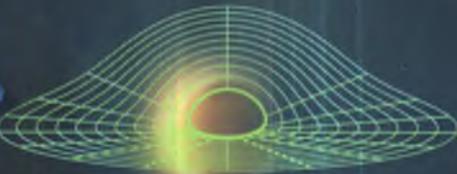
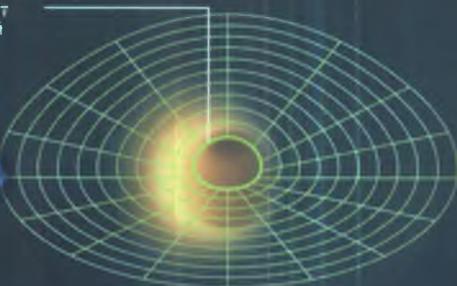
**Модель 1.** Не вращающаяся черная дыра видна под углом 30° к плоскости аккреционного диска



**Модель 2.** Не вращающаяся черная дыра видна под углом 10° к плоскости аккреционного диска



**Модель 3.** Быстро вращающаяся черная дыра видна под углом 10° к плоскости аккреционного диска



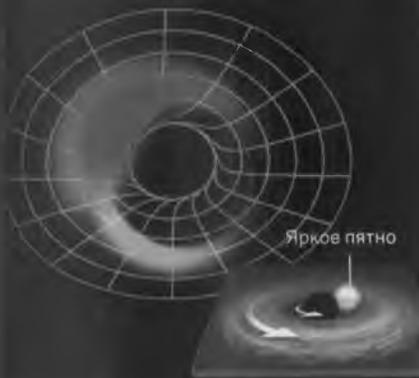
## О ЧЕМ МОЖЕТ РАССКАЗАТЬ СИЛУЭТ

Модель показывает, как должно выглядеть аккреционный диск вокруг Sgr A\* в зависимости от его ориентации и скорости вращения дыры. Три правых изображения размыты из-за рассеяния лучей в межзвездном газе.

Зеленая сеть координат лежит в плоскости аккреционного диска с центром в черной дыре. Внутреннее кольцо представляет горизонт событий черной дыры. Искривление лучей света притяжением дыры (гравитационное линзирование) искажает вид координатной сетки и делает более заметным силуэт черной дыры. Поскольку диск вращается почти со скоростью света, заметны релятивистские эффекты, из-за которых движущаяся к нам сторона диска выглядит значительно ярче (слева от горизонта событий). На нижнем рисунке момент импульса черной дыры приводит к дополнительному искривлению лучей света и искажению вида экваториальной плоскости, еще сильнее меняя наблюдаемую картину аккреции.

Итак, путем сравнения изображения Sgr A\* с моделью можно определить ориентацию диска и момент черной дыры. К тому же по размерам силуэта можно уточнить массу черной дыры

55 микросекунд дуги



**ИЗМЕРЕНИЕ ГРАВИТАЦИИ ПО ЛИНЗИРОВАННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

Астрономы могут измерять гравитацию вблизи черной дыры, анализируя созданные гравитационным линзированием сложные изображения яркого пятна на аккреционном диске. Вверху показана модель изображения яркого пятна вблизи вращающейся со средней скоростью черной дыры. Разными цветами отмечены три составляющих сложного изображения, которые объясняются на нижних рисунках.

Главное изображение (голубая область) создают радиоволны, идущие от пятна по наиболее прямому пути к Земле (голубая линия). Из-за сильного притяжения черной дыры некоторые лучи, испущенные пятном ранее, обошли вокруг дыры (зеленая линия) и достигли Земли в тот же момент, что и прямые лучи, создав вторичное изображение (зеленая область). Излучение, испущенное еще раньше, совершив полный оборот вокруг дыры (красная линия), создает едва видимое третичное изображение (красная область). Поскольку положение и форма каждого изображения зависят от того, как гравитация искривила лучи в разных местах вблизи черной дыры, анализ полной картины может показать, правильно ли общая теория относительности описывает это гравитационное поле



Техасского университета в Остине и Йенс Томас (Jens Thomas) из Института внеземной физики Общества им. Макса Планка (Гархинг, Германия) скорректировали по последним данным модель распределения звезд и темного вещества в M87. По их расчетам, масса черной дыры равна 6,4 млрд масс Солнца; так что размер ее силуэта составит три четверти от Sgr A\*.

Во многих отношениях M87 — более интересный и многообещающий объект, чем Sgr A\*. У нее есть мощный джет, протянувшийся на 5 тыс. световых лет; детальное изображение области его формирования поможет теоретикам понять механизм ультрарелятивистских истечений. В отличие от Sgr A\*, M87 видна на северном небе, что делает ее удобной для VLBI-наблюдения с помощью существующих телескопов, большинство из которых находятся в Северном полушарии. Более того, поскольку размер черной дыры в M87 в 2 тыс. раз больше чем у Sgr A\*, динамические изменения здесь будут происходить в течение нескольких суток, а не минут. Орбитальный период вблизи внутреннего края аккреционного диска должен составлять там от 0,5 до 5 недель (в зависимости от вращения черной дыры). Поэтому для M87 гораздо легче получить ряд изображений развития событий. Наконец, изображения будут менее размытыми, поскольку в направлении M87 межзвездного газа заметно меньше, чем в направлении Sgr A\*. Уже сейчас наилучшие VLBI-изображения M87 на волнах от 2 до 7 мм имеют разрешение около 100 мкс дуги, что вдвое больше ожидаемого размера силуэта.

В будущем очень интересно было бы получить изображения вспышек, которые время от времени видны в излучении Sgr A\* и M87. Если, как считают многие теоретики, некоторые из этих вспышек вызваны появлением горячих пятен в аккреционном потоке, то их можно использовать для создания детальной карты пространства-времени вокруг горизонта. Основное изображение каждого пятна будет

сопровождаться дополнительными изображениями от лучей света, приходящими к наблюдателю окружными путями вокруг черной дыры (врезка слева). Форма и положение изображений более высокого порядка покажут структуру пространства-времени вблизи черной дыры. В сущности, они должны обеспечить независимое определение этой структуры в разных местах, через которые проходит каждый пучок световых лучей изображения. Все вместе эти данные станут жестким тестом для предсказаний ОТО о поведении сильной гравитации вблизи черной дыры.

Наступает славная эпоха для наблюдений черных дыр. Спустя почти век после того как Эйнштейн разработал общую теорию относительности, мы имеем возможность проверить, правильно ли она описывает гравитацию в экстремальных окрестностях черных дыр. Изображения черных дыр станут испытательной площадкой для сравнения теории Эйнштейна с альтернативными теориями. Когда будут получены изображения Sgr A\* и M87, мы сможем детально изучить пространство-время вблизи черной дыры, не принося при этом в жертву мастера по ремонту сотовых телефонов. ■

Перевод: В.Г. Сурдин

**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

- Imaging an Event Horizon: Submillimeter VLBI of a Super Massive Black Hole. Sheperd S. Doeleman et al. in ASTRO2010 Decadal Review. Online at [arxiv.org/abs/0906.3899](http://arxiv.org/abs/0906.3899)
- Inside Black Holes. Andrew J. S. Hamilton. Includes animations of descent into a black hole. Online at [jilawwww.colorado.edu/~ajsh/insidebh](http://jilawwww.colorado.edu/~ajsh/insidebh)
- U.C.L.A. Galactic Center Group Web site: [www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc](http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc)
- Новиков И.Д. Черные дыры и Вселенная. М.: Молодая гвардия, 1985.
- Черепашук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино: Век-2, 2004.