ФИЗИКА

ПОБЕГ ИЗ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Чтобы спасти законы квантовой механики, информация с необходимостью должна уходить из черных дыр. Новые наблюдения способны помочь прояснить, как это происходит

Стивен Гиддингс

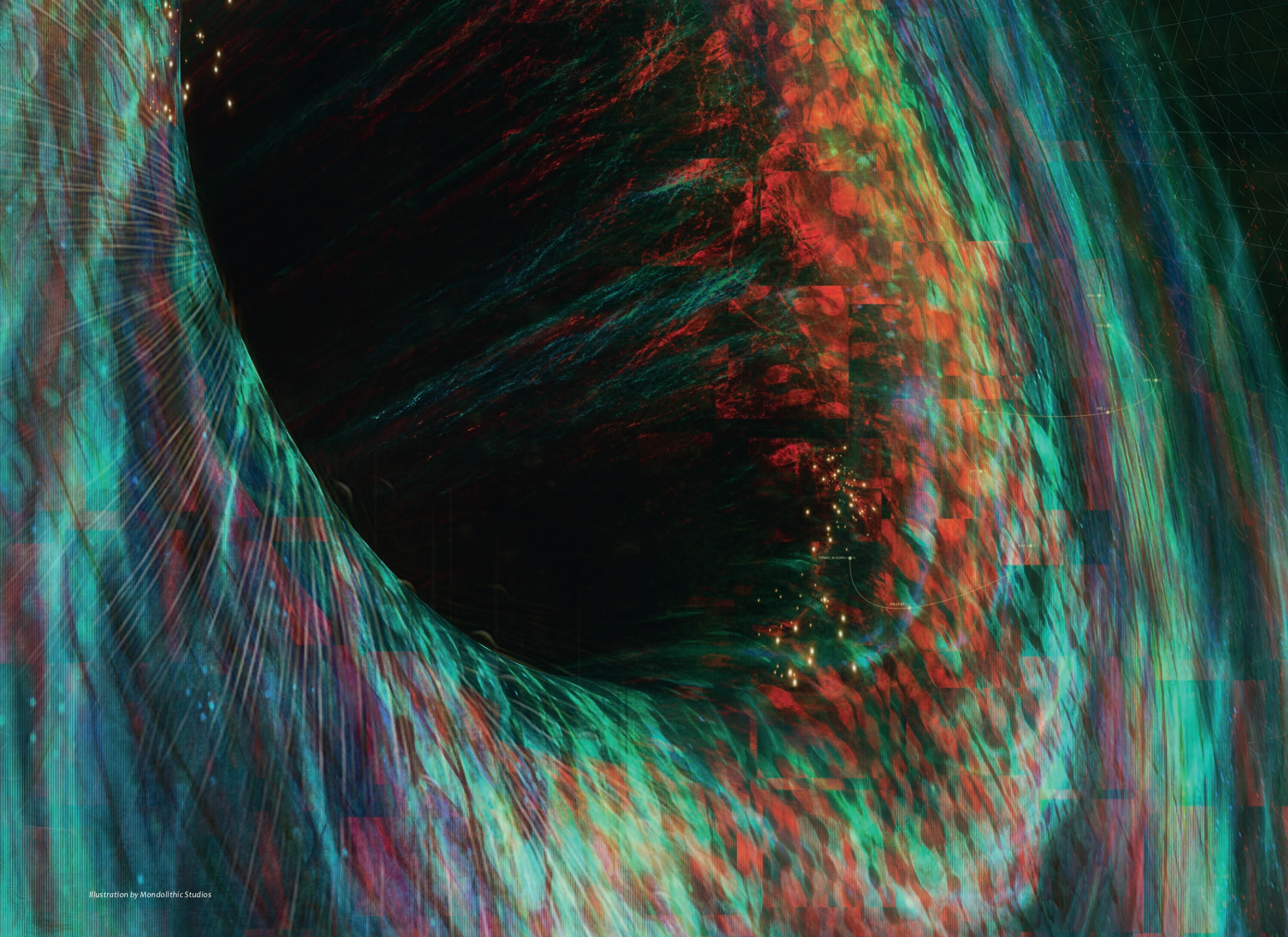


Illustration by Mondolithic Studios

ОБ АВТОРЕ

Стивен Гиддингс (Steven B. Giddings) — физик, специалист по квантовой теории из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре. Область научных интересов: теория высоких энергий, квантовые аспекты гравитации, квантовые черные дыры.

Человечество впервые увидело черную дыру 10 апреля 2019 г. благодаря работе научной команды Телескопа горизонта событий (*Event Horizon Telescope, EHT*). Этот проект представляет собой сеть синхронно работающих радиообсерваторий, которая охватывает всю нашу планету. Команда поделилась попавшими в поле зрения сети снимками черной дыры, расположенной в центре соседней галактики *M87*. Масса этой черной дыры оказалась в 6,5 млрд раз больше массы нашего Солнца. Трудно переоценить важность сделанного открытия — ведь оно стало нашим первым взглядом на один из самых загадочных объектов во Вселенной, давно предсказанный, проявлявший себя по косвенным наблюдениям, но сам никогда непосредственно не наблюдаемый. Вскоре последуют еще более захватывающие изображения, которые покажут результаты наблюдений, планируемых в ближайшем будущем. Нам откроются новые подсказки об одной из самых таинственных загадок физики.

Загадка заключается в так называемом информационном парадоксе. Что происходит с информацией в черной дыре? Исследуя этот вопрос, физики обнаружили, что само существование черных дыр несовместимо с квантово-механическими законами, которые тем не менее правильно описывают все остальное в нашей Вселенной. Разрешение этого противоречия может потребовать кардинальной революции наших представлений о мире, столь же глубокой, как и свержение классической физики квантовой механикой.

Теоретики опробовали много подходов, но прямых доказательств, которые помогли бы решить эту проблему, оказалось мало. Первое изображение черной дыры дает начало потоку реальных наблюдательных данных для проверки наших теорий. Будущие наблюдения на *EHT* — особенно те, которые могут показать, как черные дыры эволюционируют с течением времени, — и недавние обнаружения гравитационно-волновыми обсерваториями сталкивающихся черных дыр могут дать важные новые идеи и помочь вступить в эру совершенно новой физики.

Проблема информации

Хотя черные дыры глубоко загадочны, они распространены в космосе повсеместно. Наблюдения *EHT* и гравитационно-волно-

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Согласно квантовой механике, информация никогда не может быть уничтожена. Но в сочетании с общей теорией относительности квантовые правила гласят, что черные дыры уничтожают информацию.
- Ученые предлагают модификации классической картины черных дыр, которые могли бы разрешить парадокс, но не хватает доказательств, чтобы проверить новые теории.
- Эта ситуация меняется с появлением нового Телескопа горизонта событий (*EHT*), который недавно сделал первый снимок черной дыры, а также с гравитационно-волновыми измерениями слияний черных дыр.

Проблема информации

Черные дыры были предсказаны общей теорией относительности, и все больше астрофизических свидетельств подтверждают их существование. Но в 1974 г. Стивен Хокинг утверждал, что черные дыры в конечном итоге испаряются. Если это так, то все, что попадает в них, в конечном счете уничтожается, включая информацию, содержащуюся в материи, которая попала в них. Проблема в том, что квантовая механика и закон сохранения энергии запрещают такое разрушение информации. В ответ физики выдвинули несколько предложений о том, как изменить наше понимание черных дыр, чтобы сделать их совместимыми с квантовой физикой:

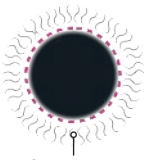
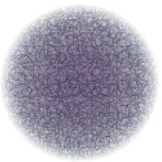
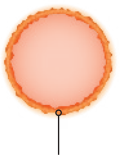
	ГИПОТЕЗА	ОПИСАНИЕ	ПРОБЛЕМА
Уничтожение информации	**«Классическая» черная дыра** Горизонт событий	Черная дыра с горизонтом событий; информация, которая попадает в черную дыру, разрушается, когда черная дыра испаряется.	Противоречие с квантовой механикой и законом сохранения энергии, согласно которому информация не может исчезнуть.
Информация не уничтожается	**«Мягкие волосы»**  Отпечаток информации	Информация не полностью попадает в черную дыру, а вместо этого оставляет «отпечаток» снаружи, непосредственно перед горизонтом событий.	Большинство экспертов не считают эту картину убедительным решением проблемы.
	«Пушистый шар» 	Тип массивного остатка, в котором горизонт событий черной дыры заменяется струнами и геометрией высоких размерностей.	Все три сценария требуют модификации общепризнанного принципа локальности, согласно которому ничто, включая информацию, не может передвигаться со сверхсветовой скоростью.
	Экран  Стена из частиц	Тип массивного остатка, в котором «стена» частиц с высокими энергиями замещает горизонт событий; у такого объекта нет внутренней части черной дыры.	
	Квантовое гало	Квантовая черная дыра взаимодействует со своим окружением, возможно, с помощью малых флуктуаций в пространстве-времени, приводя к выходу информации наружу.	

Illustration by Amanda Montañez

вые измерения — это всего лишь самые последние и надежные доказательства того, что черные дыры, несмотря на свою фантастичность, действительно реальны и многочисленны. Однако само существование этих объектов угрожает основам современной физики. Считается, что базовые принципы квантовой механики управляют всеми другими законами природы, но когда они применяются к черным дырам, то приводят к противоречию, обнажая недостатки современных формулировок этих законов.

Проблема возникает из рассмотрения одного из простейших вопросов, которые мы можем задать о черных дырах: что происходит с попадающим в них веществом? Тут нам необходимо привести некоторое уточнение. Во-первых, согласно квантово-механическим законам в их современной формулировке, материя и энергия могут преобразовываться из одной формы в другую: например, одни частицы могут превращаться в разные частицы других видов. Однако единственное, что не должно разрушаться ни при каких процессах, — это квантовая информация. Если мы знаем полное квантовое описание системы, то мы всегда должны уметь точно определить ее более раннее или более позднее квантовое состояние без потери информации. Можно более конкретно сформулировать первоначальный вопрос: что происходит с квантовой информацией, которая попадает в черную дыру?

Наше понимание черных дыр восходит к общей теории относительности Альберта Эйнштейна, которая описывает гравитацию как возникающую из кривизны пространства и времени. Популярной визуализацией этой идеи служит тяжелый шар, лежащий на поверхности батута и деформирующий ее. Искривление пространства-времени вызывает искривление траекторий массивных тел и света, и мы называем это гравитацией. Если масса очень сильно сконцентрирована в достаточно малой области, то ближайшее к ней искривление пространства-времени настолько велико, что даже свет не может покинуть область, ограниченную так называемым горизонтом событий. Это и есть черная дыра. Если ничто не способно двигаться быстрее света — включая информацию, — то все должно застрять внутри этой границы. Черные дыры становятся своего рода космическими воронками, поглощающими информацию вместе со светом и материей.

Гравитация искривляет *свет вокруг видимой черной дыры в центре галактики M87 (изображение получено телескопом EHT)*

EHT COLLABORATION AND EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY

Однако история становится все более странной. Возможно, величайшее научное достижение Стивена Хокинга — это его предсказание 1974 г. о том, что черные дыры испаряются. Это утверждение привело к поразительной идее, что черные дыры уничтожают квантовую информацию. Согласно квантовой механике, пары «виртуальных частиц» появляются всегда и везде. Обычно такая пара, состоящая из частицы и ее двойника-античастицы, быстро аннигилирует. Однако если пара рождается вблизи горизонта черной дыры, то одна частица может оказаться внутри области, ограниченной горизонтом событий, а другая частица — снаружи. Внешняя частица может уйти далеко от черной дыры, унося с собой энергию. Закон сохранения энергии говорит нам, что черная дыра таким образом теряет энергию, поэтому излучение уходящих частиц заставляет черную дыру с течением времени сжиматься, пока та полностью не исчезнет, «испарится». Проблема заключается в том, что уходящие частицы, известные как излучение Хокинга, практически не несут информации о том, что ранее попало в черную дыру. Итак, расчеты Хокинга, по-видимому, показывают, что

квантовая информация, которая попадает в черную дыру, в конечном счете разрушается. Это утверждение противоречит законам квантовой механики.

Указанное обстоятельство вызвало глубокий кризис в физике. В прошлом попытки разрешить кризисы физических теорий приводили к прорывным успехам. Так, в начале XX в. классическая физика, казалось, предсказывала неизбежную нестабильность атомов, что явно противоречило существованию устойчивого вещества. Эта проблема сыграла ключевую роль в квантовой революции. Классическая физика подразумевает, что из-за того, что орбитальные электроны внутри атомов постоянно меняют направление, они постоянно излучают, в результате чего теряют энергию и спирально падают в ядро. Однако в 1913 г. Нильс Бор предположил, что электроны на самом деле перемещаются только по квантованным орбитам и не могут двигаться по спирали. Эта радикальная идея помогла заложить основы квантовой механики, которая в корне переосмыслила наше понимание законов природы. Некоторые ученые полагают, что проблема финальной стадии испарения черных дыр точно так же сможет привести к очередному сдвигу парадигмы в физике.

Квантовые альтернативы

Когда Стивен Хокинг впервые теоретически предсказал испарение черной дыры, он сделал это в предположении, что квантовая механика с необходимостью должна быть неправильной и что разрушение информации разрешено. Однако физики вскоре поняли, что внесение изменений в квантовую механику приведет к кардинальному нарушению закона сохранения энергии, из-за чего, в свою очередь, наше нынешнее описание Вселенной катастрофически сойдет на нет. Очевидно, что решение должно быть найдено как-то иначе.

Другая из высказанных ранее идей заключалась в том, что черные дыры не полностью испаряются, а вместо этого в какой-то момент перестают сжиматься, оставляя после себя микроскопические остатки, содержащие исходную информацию. Но согласно мнению некоторых ученых, окажись это правдой, по основным свойствам квантовой физики возникли бы катастрофические нестабильности. В результате последних при образовании остатков черных дыр должны были бы происходить взрывы обычного вещества, что противоречит наблюдениям.

Очевидно, что-то в используемых подходах глубоко неправильно. Заманчиво сделать заключение, что недостаток заключается в первоначальном анализе Хокинга и что каким-то образом информация действительно ускользает из черной дыры, испускающей излучение Хокинга. Проблема в том, что этот сценарий будет противоречить основополагающей концепции современной физики, принципу локальности, который утверждает, что информация не может перемещаться из одного места в другое сверхсветовым способом — то есть быстрее скорости света. Но согласно нашему определению черных дыр, единственный способ уйти от них — это путешествовать быстрее света, так что если информация действительно ускользает, то она должна делать это со сверхсветовой скоростью, в конфликте с принципом локальности. За четыре десятилетия, прошедшие с момента теоретического вывода Хокинга, физики пытались найти лазейку в этом аргументе, которая оставалась бы в рамках обычной физики, однако ничего не вышло.

Недавней попыткой продвинуться дальше в этих исследованиях было предложение Стивена Хокинга, Малкольма Перри (Malcolm Perry) и Эндрю Строминджера (Andrew Strominger). Ученые предположили, что в отличие от начальной модели следует считать информацию никогда полностью не входящей в черную дыру. Другими словами, информация оставляет своего рода отпечаток в виде того, что они назвали «мягкими волосами» (*продолжая терминологию в ключе названия теоремы об отсутствии волос. — Примеч. пер.*), снаружи черной дыры. Однако более пристальный анализ такой модели, похоже, делает ее менее реалистичной. Большинство экспертов не верят, что она может дать правильный ответ на вопрос об испарении черной дыры. Короче говоря, необходимы более радикальные шаги.

Очевидная идея заключается в том, что есть какая-то неизвестная физика, которая предотвращает существование истинных черных дыр вообще. Общепринятая картина образования черных дыр гласит, что когда очень большие звезды сгорают и умирают, их масса коллапсирует под действием силы тяжести в черную дыру. Но что если они никогда не достигнут этой стадии и действительно превратятся в объекты с более «примерным» поведением? На самом деле мы знаем, что когда звезды с меньшей массой, такие как наше Солнце, выгорают

и коллапсируют, они не образуют черных дыр, а вместо этого образуют плотные остатки — например, белые карлики или нейтронные звезды. Возможно, некоторые неизвестные законы физики также препятствуют образованию больших звезд из черных дыр и вместо этого приводят к формированию своего рода «массивных остатков», которые больше похожи на нейтронную звезду, чем на черную дыру.

Проблема с последним предположением заключается в том, что нет возможности объяснить причину устойчивости таких объектов, поскольку ни один из известных физических процессов не должен препятствовать непрерывному коллапсу под действием гравитации. Другими словами, любая воображаемая физика, в рамках которой такое оказалось бы возможным, потребовала бы, по-видимому, обмена сверхсветовыми сигналами от одной части коллапсирующего вещества к другой. На самом деле обычные большие черные дыры могут образовываться из вещества с очень низкой плотностью. Например, если бы черная дыра массой 6,5 млрд солнечных масс в *M87* возникла в результате коллапса пылевого облака (что теоретически возможно, хотя на самом деле процесс был, по-видимому, более сложным), то это могло бы произойти, когда пыль достигла плотности воздуха на вершине Эвереста. (Воздух на вершине Эвереста не образует черной дыры, потому что его количества недостаточно; для этого потребуется накопить 6,5 млрд солнечных масс.) Какой-то принципиально другой и к тому же сверхсветовой физический процесс должен был бы взять верх в режиме низкой плотности, чтобы мгновенно преобразовать коллапсирующее облако в массивный остаток вместо того, чтобы позволить черной дыре образоваться.

Сами наши представления о пространстве и времени, лежащие в основе остальной науки, по-видимому, требуют значительного пересмотра

Продолжая развивать мысль в русле предыдущей идеи, можно предположить существование чего-то такого, что может заставить черные дыры превращаться в массивные остатки, содержащие исходную информацию, уже после того, как они сформируются, но задолго до того, как они испарятся. Однако такой вариант снова потребует нелокальной передачи информации из недр начальной черной дыры в конечный остаток.

Несмотря на обнаруживаемые трудности, физики исследовали версии обоих этих сценариев. Так, в 2003 г. Самир Матур (Samir Mathur) выдвинул предложение, основанное на теории струн. Согласно этой теории, фундаментальные частицы — это крошечные струны (*колебания крошечных струн. — Примеч. пер.*). Идея Матура состояла в том, что черная дыра превращается в этакий «пушистый шар», своего рода массивный остаток, или что этот «пушистый шар» вообще образуется вместо черной дыры. Благодаря сложной физике теории струн и ее учету большего, чем традиционные четыре измерения, пространства-времени, у «пушистых шаров» может быть сложная геометрия более высоких измерений; вместо резкой традиционной границы черной дыры на горизонте событий у «пушистого шара» будет более размытая и большая граница, где мы сталкиваемся со струнами и геометрией более высоких измерений.

В качестве альтернативы более поздняя версия сценария остатка — это предположение, что вместо черной дыры с горизонтом событий образуется массивный остаток с поверхностным защитным «экраном» частиц высокой энергии, где будет горизонт. Этот экран испепелит все, что с ним столкнется, превратив все в чистую энергию, которая добавится к энергии самого экрана. И экран, и «пушистый шар», однако, разделяют проблему необходимости нарушения принципа локальности, и результирующие объекты будут иметь другие свойства, которые очень трудно объяснить.

Изменяя локальность

Общее положение в теориях массивного остатка заключается в том, что сохранение квантовой механики, по-видимому, требует нарушения принципа локальности. Но небрежное обращение с ним, как ожидается, будет столь же катастрофичным, как и изменение квантовой механики, и, по сути, приведет к другому парадоксу. В частности, законы теории относительности говорят, что если вы посылаете сигнал быстрее света в пустом плоском пространстве, то наблюдатели, путешествующие мимо вас с высокой скоростью, увидят сигнал, идущий назад во времени. Парадокс возникает потому, что этот сверхсветовой обмен сигналами

позволяет вам отправить сообщение в ваше прошлое, например, попросить кого-то убить вашу бабушку до рождения вашей матери.

Хотя такой ответ, по-видимому, противоречит фундаментальным физическим принципам, он заслуживает более пристального внимания. Изменение принципа локальности кажется безумным, но мы не нашли альтернативы, которая его не меняет. Серьезность вопроса о природе кризиса черных дыр настоятельно предполагает введение некоторого тонкого нарушения принципа локальности, которое не порождает подобных парадоксов. Иначе говоря, квантовая механика подразумевает, что информация никогда не уничтожается, поэтому информация, которая попадает в черную дыру, в конечном счете должна уйти, возможно, через какую-то новую, тонкую «делокализацию» информации, которая может стать ясной, когда мы наконец найдем способ объединить квантовую механику с гравитацией. Последняя задача представляет собой одну из самых глубоких проблем современной физики. На самом деле, у нас есть и другие причины думать, что такая тонкость может присутствовать. Сама идея локализованной информации — то, что она может существовать в одном месте, а не в другом, — более сложна в теориях, которые включают гравитацию, чем в тех, которые этого не делают, потому что гравитационные поля простираются до бесконечности, усложняя концепцию локализации.

Если информация действительно ускользает от черной дыры, последняя может не потребовать столь очевидного и резкого изменения, как образование массивного остатка, будь то «пушистый шар», экран или что-то иное. Растущее число свидетельств существования черных дыр говорит о том, что во Вселенной есть объекты, которые выглядят и действуют во многом как классические черные дыры, без больших отклонений от предсказаний Эйнштейна. Настолько ли кардинально неверна общая теория относительности Эйнштейна в своем описании черных дыр или могут быть какие-то более безобидные, неизвестные в настоящее время эффекты, которые делокализуют информацию и позволяют ей просачиваться из черных дыр, избегая такого драматического обрушения нашей картины пространства-времени?

В моей недавней теоретической работе я нашел два возможных варианта таких эффектов. В одном случае геометрия пространства-времени вблизи черной дыры изменяется: она искривляется и идет рябью определенным образом, зависящим от информации в черной дыре. Эти изменения незначительны, «мягки» — другими словами, они не разорвут космонавта, пересекающего горизонт событий. В таком сценарии (я назвал его «сильным») мерцание пространства-времени может передавать информацию. Интересно то, что я также обнаружил существование более тонкого, квантового способа выхода информации из черной дыры. В этом сценарии (я назвал его «слабым») даже крошечные квантовые флуктуации геометрии пространства-времени вблизи черной дыры могут передавать информацию частицам, исходящим из этой черной дыры. Количество переданной информации все еще достаточно велико для того, чтобы спасти квантовую механику, потому что черная дыра может содержать огромное количество возможной информации. В любом случае черная дыра фактически имеет «квантовое гало», окружающее ее. В этом гало взаимодействия передают информацию в него же обратно.

Примечательно, что эти сценарии, несмотря на кажущуюся необходимость сверхсветового перемещения информации, не обязательно порождают парадокс путешествия назад во времени. Обмен информационными сигналами здесь связан с существованием черной дыры, которая имеет геометрию пространства-времени, отличную от геометрии плоского пространства, так что ранее высказанный аргумент об общении с прошлым больше не имеет силы. Эти возможности провокационны с другой точки зрения: принцип локальности — это то, что препятствует нашему собственному путешествию быстрее света; квантовая механика черных дыр, кажется, дает указания на нечто неправильное в нынешней формулировке этого принципа.

Переписывая законы физики

До сих пор сценарий существования рассмотренного выше квантового гало не был предсказан никакой расширенной физической теорией, совмещающей квантовую механику с гравитацией. Однако такой сценарий имеет право на существование из-за необходимости решения проблемы и исходя из предположений, основанных на наблюдениях. Если такой сценарий верен, он, вероятно, представляет собой приблизительное описание более глубокой реальности. Сами наши представления о пространстве

и времени, лежащие в основе остальной науки, по-видимому, требуют значительного пересмотра. Моя работа по пониманию черных дыр может оказаться сродни первым попыткам моделирования физики атома Нильсом Бором и другими учеными. Эти ранние описания атомов также были приближенными и лишь позднее привели к глубокой теоретической структуре квантовой механики. Хотя изменение принципа локальности кажется слишком смелым шагом, мы могли бы найти утешение, заметив, что законы квантовой механики также казались очень безумными для классических физиков, борющихся с их открытием. Учитывая огромную трудность в выяснении истории квантовых черных дыр и поиске более полной теории, описывающей их, физики стремятся к получению экспериментальных и наблюдательных следствий, которыми можно было бы руководствоваться. Захватывающие последние достижения дали человечеству два прямых окна для наблюдения за поведением черных дыр. В дополнение к изображениям черных дыр с помощью *EHT* Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория (*LIGO*) и сотрудничающие с ней проекты начали обнаруживать гравитационные волны от столкновений между черными дырами. Гравитационные волны несут с собой ценную информацию о свойствах и поведении породивших их объектов.

С наивной точки зрения кажется абсурдным, что *EHT* или *LIGO* могли обнаружить какое-либо отклонение от описания черных дыр Эйнштейном. Традиционно считалось, что его теория нуждается в модификации только тогда, когда кривизна пространства-времени становится чрезвычайно большой вблизи центра черной дыры; напротив, кривизна очень слаба вблизи горизонта большой черной дыры. Но описанная мной проблема потери информации говорит об обратном. В настоящее время часть научного сообщества пришла к мнению, что для описания явлений, происходящих не только глубоко внутри черной дыры, но и за горизонтом, необходимы некоторые изменения в существующих законах физики. Похоже, мы перешли Рубикон. Для случая черной дыры в *M87* расстояние, на котором мы ожидаем найти отклонения от классических предсказаний, в несколько раз превышает размер нашей Солнечной системы.

Проекты *LIGO* и *EHT* уже исключили более экзотические возможности, которые можно было бы рассмотреть в попытке дать логически последовательное описание черных дыр. В частности, если бы черные дыры были заменены массивными остатками, более чем вдвое превышающими диаметр предполагаемой черной дыры, то мы бы увидели признаки в обоих экспериментах. В случае *EHT* бóльшая часть света, который дал известное теперь изображение, исходит из области, примерно в полтора раза превышающей диаметр горизонта событий. И для *LIGO* часть зарегистрированного гравитационно-волнового сигнала также производится из области, где сталкивающиеся объекты достигают столь же малых взаимных расстояний. Хотя изучение этих сигналов все еще находится на ранних стадиях, *EHT* и *LIGO* выявили очень темные и очень компактные объекты, которые производят точно такие же сигналы, как предсказанные для «классических» черных дыр.

Тем не менее важно исследовать эти сигналы детально. Достаточно тщательный анализ мог бы на самом деле открыть больше ключей к квантовой физике черных дыр. Даже если никаких новых эффектов наблюдаться не будет, мы уже сейчас получаем информацию, которая ограничивает возможные описания квантового поведения черных дыр.

Остатки большого диаметра теперь исключаются, но как насчет сценариев остатков, которые изменяют описание черной дыры только очень близко к горизонту? Хотя полное обсуждение потребовало бы более полной теории этих остатков — таких как «пушистые шары» или экраны, — у нас есть некоторые начальные указания. В частности, если бы эти объекты имели радиусы, чуть превышающие радиус соответствующего горизонта черной дыры, то вполне вероятно, что ни наблюдения *EHT*, ни наблюдения *LIGO* не смогли бы выявить такую структуру, потому что очень мало света или гравитационного излучения выходило бы из области, настолько близкой к горизонту событий.

Одно возможное исключение — это гравитационное «эхо». Как впервые предложили в 2016 г. Витор Кардосо (Vitor Cardoso) из Лиссабонского университета, Эдгардо Францин (Edgardo Franzin) из Барселонского университета и Паоло Пани (Paolo Pani) из Римского университета, если два таких остатка объединяются, образуя конечный остаток, обладающий сходными свойствами, то гравитационные волны могут отражаться от поверхности объединенного остатка и быть наблюдаемыми. В то время

как большинство близких к горизонту сценариев трудно исключить с помощью наблюдений, нелегко также объяснить, как такие структуры могут быть устойчивыми, не разрушаться под собственным весом с образованием черных дыр. Конечно, это общая проблема для всех сценариев с массивными остатками, но она становится еще более сложной при наличии экстремальных сил в таком столкновении.

Перспективы лучше для тестирования таких сценариев, где новые взаимодействия ведут себя как малые изменения геометрии пространства-времени, но простираются далеко за горизонт. Например, в моем «сильном» сценарии дрожание квантового гало черной дыры может исказить свет, проходящий вблизи этой черной дыры. Если такой сценарий верен, то могут возникнуть искажения изображений *EHT*, которые изменяются со временем.

В моем совместном труде с работающим на *EHT* ученым Димитриосом Псалтисом (Dimitrios Psaltis) мы обнаружили, что эти изменения могут произойти примерно за час для черной дыры в центре нашей Галактики. Поскольку *EHT* объединяет многочасовые наблюдения в среднее значение, то такие эффекты трудно увидеть. Однако за соответствующее время флуктуации для черной дыры в *M87*, которая более чем в тысячу раз больше, эта величина составит уже десятки дней и больше. Наша работа предполагает, что следует искать эти искажения, используя более длительные наблюдения *EHT*, чем первоначальный семидневный период проекта. Если бы эксперимент обнаружил такие искажения, это был бы впечатляющий ключ к квантовой физике черных дыр. Если же они не появятся, это будет указанием на более тонкий «слабый» квантовый сценарий или на что-то еще более экзотичное.

«Слабый» сценарий труднее проверить из-за относительной малости ожидаемых изменений геометрии. Однако предварительное исследование показывает, что этот сценарий может изменить способ поглощения или отражения гравитационных волн, возможно, приводя к заметному изменению гравитационно-волновых сигналов.

Окажись верным любой из этих сценариев — и мы узнаем больше не только о том, что такое квантовые черные дыры, но и о более глубоких законах природы. Сейчас мы не до конца понимаем, как трактовать принцип локализации информации при наличии гравитационных полей. Квантовая физика предполагает, что само пространство-время — не фундаментальная часть физики, но возникает лишь как приближение более фундаментальной математической структуры. Доказательства квантовых эффектов черных дыр могут помочь сделать эту концепцию более конкретной.

Для того чтобы понять больше, важно расширить и улучшить как измерения *EHT*, так и гравитационно-волновые измерения. В случае *EHT* было бы полезно осуществлять значительно более длительные наблюдения, а также получать изображения других целей, таких как центральная черная дыра нашей Галактики, которые ожидается получить в ближайшем будущем. Для гравитационно-волновых наблюдений важно повышать чувствительность. Ряды гравитационно-волновых детекторов скоро пополнятся проектами Японии и Индии, которые будут добавлены к уже существующим проектам в США и Европе. Кроме того, необходимы серьезные дополнительные теоретические усилия для уточнения сценариев, выяснения их происхождения и математических обоснований, а также для более тщательной оценки вопроса о том, насколько существенно они могут влиять на ожидаемые сигналы *EHT* или гравитационно-волновые сигналы.

Каким бы ни оказалось решение проблемы существования и испарения черных дыр, эти объекты содержат важнейшие ключи к основам квантовой физики гравитации, а также к самой природе пространства и времени. Как и в случае с атомом и квантовой механикой, лучшее понимание черных дыр, вероятно, поможет направить следующую концептуальную революцию в физике. Наблюдения *EHT* и гравитационных волн потенциально могут дать нам ключевую информацию, либо исключив сценарии квантовых черных дыр, либо открыв новые явления, связанные с ними. ■

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

■ Полчински Д. Огненная грань миров // ВМН, № 5–6, 2015.

■ Particle Creation by Black Holes. Stephen W. Hawking in Communications in Mathematical Physics, Vol. 43, No. 3, pages 199–220; August 1975.

■ Jerusalem Lectures on Black Holes and Quantum Information. Daniel Harlow in Reviews of Modern Physics, Vol. 88, Article No. 015002; February 2016.

■ Black Holes in the Quantum Universe. Steven B. Giddings in Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol. 377, Article No. 20190029; November 2019.