

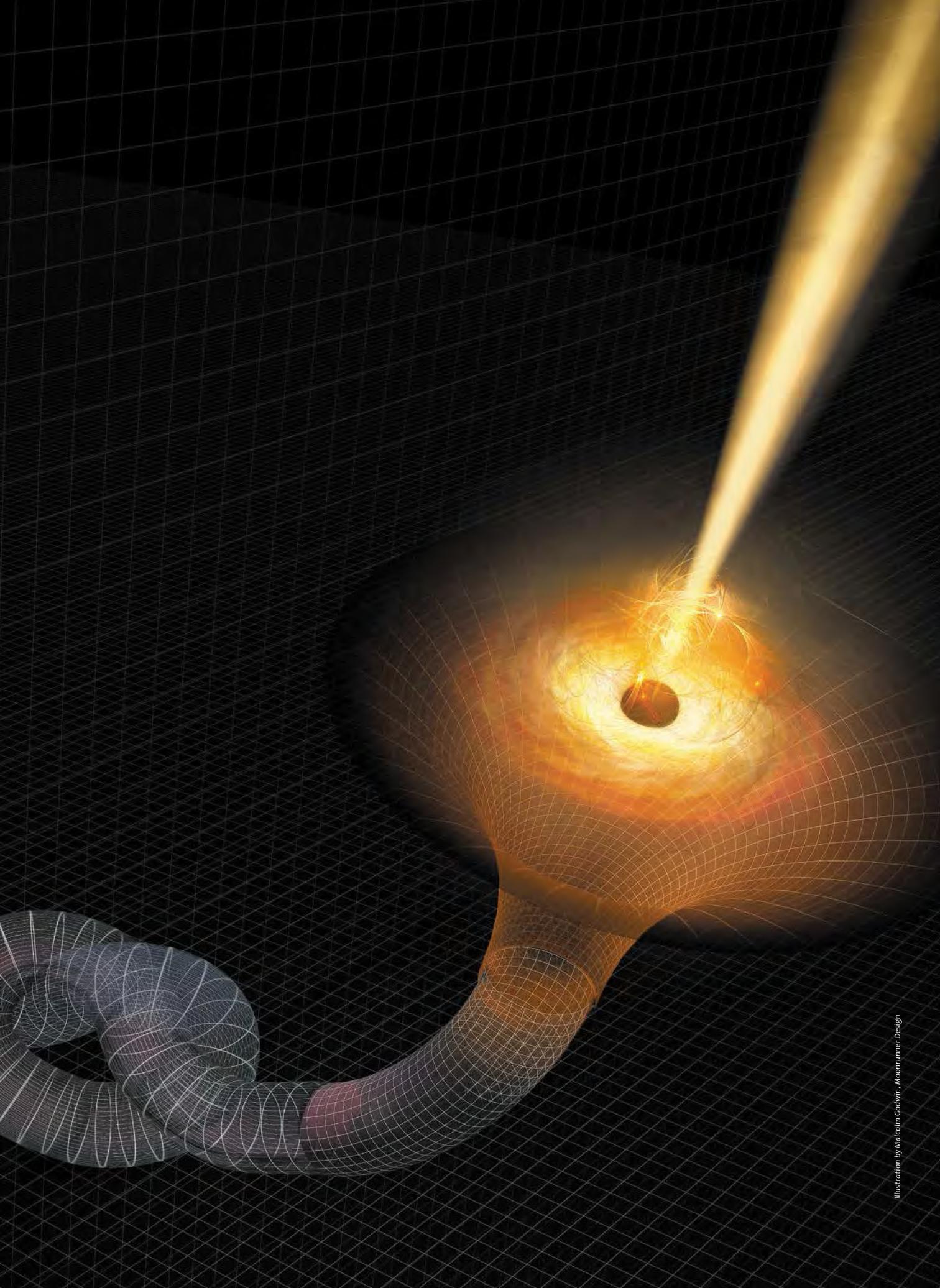


ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

# ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ, КРОТОВЫЕ НОРЫ И СЕКРЕТЫ КВАНТОВОГО ПРОСТРАНСТВА- ВРЕМЕНИ

Хуан Малдасена

Загадочные явления квантовой запутанности могут породить кратчайшие перемины между удаленными черными дырами



## ОБ АВТОРЕ

**Хуан Малдасена** (Juan Maldacena) — физик-теоретик из Института перспективных исследований в Принстоне, штат Нью-Джерси. Известен вкладом в изучение квантовой гравитации и теорию суперструн. Лауреат Премии за прорыв в области фундаментальной физики 2012 г.



**Т**еоретическая физика изобилует умопомрачительными идеями. Наиболее странные из них — это квантовая запутанность и кротовые норы. Квантовая запутанность предсказывается квантовой механикой и описывает неожиданную связь объектов (прежде всего, атомов и субатомных частиц), у которых нет никакой видимой физической связи. Кротовые норы возникают в общей теории относительности и представляют собой своеобразные «мосты», соединяющие удаленные области пространства-времени. Недавние исследования наводят на мысль о возможной связи между такими, казалось бы, далекими друг от друга концепциями.

Основываясь на расчетах, используемых в математической теории черных дыр, удалось показать, что квантово-механическая задача запутанности может оказаться эквивалентной задаче о кротовой норе в общей теории относительности. Другими словами, квантовая теория и теория гравитации, вполне возможно, дают различные описания одного и того же физического феномена, и мы склонны думать, что эта схожесть проявляется не только в случае черной дыры.

Такая эквивалентность имеет далеко идущие последствия. Во-первых, пространство-время может выйти из-под контроля фундаментальных микроскопических «кирпичиков» Вселенной. Во-вторых, связь двух удаленных объектов посредством таинственного эффекта квантово-механической запутанности (который долгое время считался проявляющим себя без каких-либо видимых физических причин) может найти гораздо менее фантастическое объяснение. Кроме того, связь запутанности с кротовыми норами сможет помочь в разработке единой теории квантовой механики

и пространства-времени — квантовой гравитации, которая управляет физикой макрокосмоса с помощью законов, регулирующих взаимодействия в мирах атомных и субатомных частиц. Такая теория необходима для понимания процесса Большого взрыва или для исследования внутренней структуры черной дыры. Интересно отметить, что как проблема квантовой запутанности, так и теоретическое обоснование возможности существования кротовых нор появились в 1935 г. в статьях, написанных Альбертом Эйнштейном и его коллегами. На первый взгляд, речь идет о двух совершенно различных явлениях — сам Эйнштейн, скорее всего, не подозревал об их возможной связи. На самом деле, эффект квантовой запутанности был к тому времени уже известен и вызывал сильное беспокойство Эйнштейна, который называл этот эффект «жутким действием на расстоянии». Ирония развития научной мысли в том, что именно этот «жуткий эффект», возможно, поможет соорудить мост, по которому теория относительности Эйнштейна проникнет в квантовый мир.

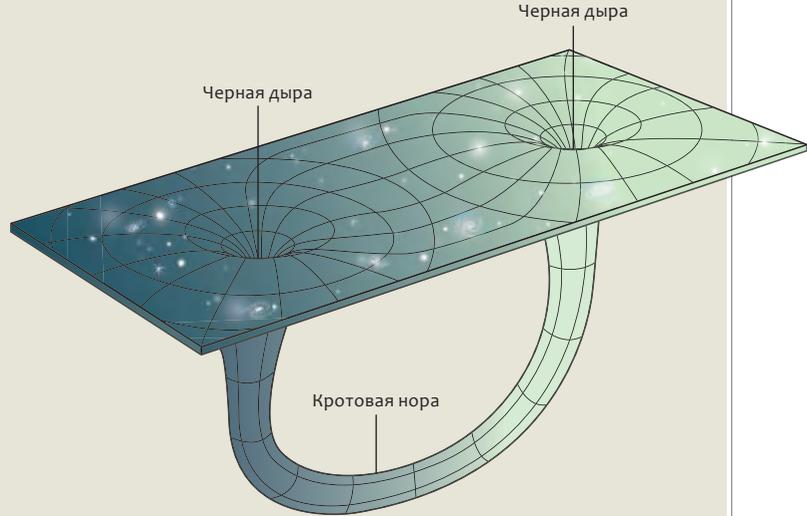
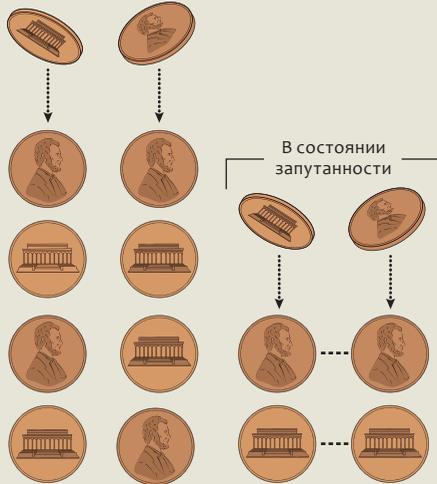
## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Законы квантовой физики приводят к тому, что удаленные объекты оказываются в квантовом состоянии запутывания. Это означает, что действие одного объекта влияет на другие, хотя физической связи между ними нет.
- Уравнения общей теории относительности, описывающие геометрию пространства-времени, приводят к идее существования кротовых нор — мостов, соединяющих удаленные друг от друга области пространства-времени.
- Ученые предполагают, что два феномена могут оказаться эквивалентными, а это поможет развитию квантового описания пространства-времени.

СВЯЗЫВАЯ ДВЕ ТЕОРИИ

## Запутанность встречает кротовую нору

Запутанность — это понятие из квантовой механики, описывающее особый тип корреляции между удаленными объектами. Кротовые норы, которые предсказываются общей теорией относительности, представляют собой теоретические мосты в пространстве-времени, соединяющие удаленные друг от друга черные дыры. Ученые полагают, что эти два феномена, кажущиеся не связанными, могут оказаться фундаментально едиными.



### Запутанность

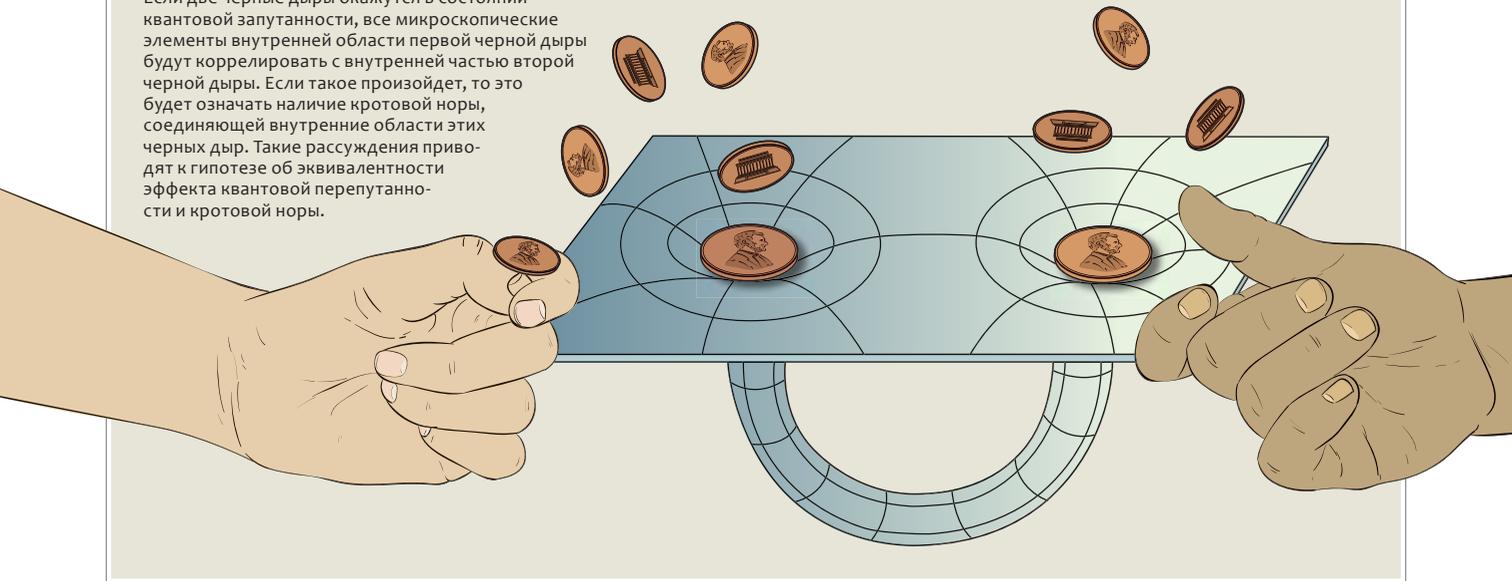
Когда подбрасываются две обычные монеты, выпадение орла или решки происходит независимо на обеих монетах. Однако если они находятся в состоянии квантовой запутанности, результат одной монеты однозначно определяет результат другой: выпавший на первой монете орел диктует, что на второй монете также выпадает орел, и точно так же выпавшая на первой монете решка обязывает к выпадению решки и на второй монете.

### Одно и то же?

Если две черные дыры окажутся в состоянии квантовой запутанности, все микроскопические элементы внутренней области первой черной дыры будут коррелировать с внутренней частью второй черной дыры. Если такое произойдет, то это будет означать наличие кротовой норы, соединяющей внутренние области этих черных дыр. Такие рассуждения приводят к гипотезе об эквивалентности эффекта квантовой запутанности и кротовой норы.

### Кротовая нора

Согласно уравнениям общей теории относительности, могут существовать кротовые норы — пространственно-временные мосты, соединяющие черные дыры, даже если они находятся на большом расстоянии друг от друга. С точки зрения внешнего наблюдателя черные дыры пространственно не соединяются, но их внутренние области могут быть соединены, хотя ни люди, ни сигналы сквозь них не пройдут.



### Черные дыры и кротовые норы

Для того чтобы объяснить связь эффекта квантовой запутанности с кротовыми норами, сначала необходимо вспомнить некоторые важные свойства черных дыр, которые глубоко вовлечены в эту идею. Черные дыры — это области искривленного

пространства-времени, которые сильно отличаются от относительно неискаженного пространства (трехмерно-плоского. — Примеч. пер.), к которому мы привыкли. Отличительная особенность черной дыры заключается в том, что мы можем разделить ее геометрию на две области. Первая область —

внешняя, где пространство искривлено, но материальные объекты и сигналы могут уходить в бесконечность. Вторая область — внутренняя, которая лежит за так называемой точкой невозвращения. Внешняя и внутренняя область разделены поверхностью, называемой горизонтом событий. Согласно общей теории относительности, горизонт событий — это воображаемая поверхность: космонавт, пересекающий горизонт событий, не почувствует ничего особенного именно на этой поверхности. Однако переступив ее, космический путешественник лишается возможности спастись и обречен быть разорванным чудовищной кривизной. Можно сказать, что, оказавшись под горизонтом, космонавт начинает двигаться во времени, и поэтому его возвращение из-под горизонта означало бы, что он будет двигаться вспять во времени и попадет в свое прошлое, что невозможно.

## **В 1935 г. Эйнштейн и Натан Розен предположили, что общая внутренняя часть черных дыр представляет собой кротовую нору, которая получила название «мост Эйнштейна — Розена»**

Всего через год после того, как Эйнштейн представил свою общую теорию относительности, немецкий физик Карл Шварцшильд нашел простое решение уравнений Эйнштейна, которое описывало гипотетический объект, позже названный черной дырой. Предложенная Шварцшильдом геометрия оказалась такой неожиданной, что только в 60-е гг. прошлого века ученые смогли во всей полноте осознать, что эта геометрия описывает своего рода пространственно-временной мост между двумя черными дырами, или кротовую нору. Снаружи черные дыры представляют собой локализованные объекты, отделенные большими расстояниями друг от друга, но они оказываются объединенными своими внутренними областями. В 1935 г. Эйнштейн и его коллега Натан Розен, позже работавший в Институте перспективных исследований в Принстоне, штат Нью-Джерси, предположили, что общая внутренняя часть черных дыр представляет собой кротовую нору, хотя до конца геометрия такого объекта ими изучена не была. Кротовая нора получила название «мост Эйнштейна — Розена» (ЭР-мост).

Кротовая нора в решении Шварцшильда отличается от черной дыры, которая формируется в космосе естественным путем в идеализированных предположениях об отсутствии вещества, — это только искривление пространства-времени. Из-за

наличия вещества естественно формирующиеся черные дыры обладают только одной внешней областью. Большинство исследователей считают полное решение Шварцшильда с двумя внешними областями просто математическим курьезом, не имеющим отношения к реальным черным дырам в космосе. Тем не менее физическая интерпретация этого решения может оказаться интересной, и многие ученые задались этим вопросом.

В решении Шварцшильда кротовая нора, соединяющая внешние области двух черных дыр, изменяется со временем. Она удлинняется и становится тоньше, растягиваясь с течением времени, как кусок эластичного теста. Тем временем горизонты двух черных дыр, которые соприкасаются в одной точке, стремительно разделяются. Фактически этот процесс происходит настолько быстро, что соединяющая их кротовая нора не может быть использована для путешествий от внешней области одной черной дыры к внешней области другой. Кроме того, образно выражаясь, этот мост рухнет, прежде чем кто-то сможет пройти по нему. Если снова использовать аналогию с растягивающимся тестом, обрушение моста соответствует тому, что тесто при большем и большем растяжении станет бесконечно тонким.

Важно заметить, что обсуждаемые в статье кротовые норы не противоречат законам общей теории относительности, в которой запрещены физические скорости, превышающие скорость света. Таким образом, эти кротовые норы радикальным образом отличаются от научно-фантастических выдумок, где они используются для мгновенной транспортировки между удаленными областями пространства, как в фильме «Интерстеллар». Научно-фантастические версии зачастую нарушают известные физические законы.

Научно-фантастическая история, грамотно использующая кротовую нору рассматриваемого вида, могла бы быть, например, такой. Представьте себе двух юных влюбленных, Ромео и Джульетту. Их семьи испытывают друг к другу неприязнь и поэтому расселили юношу и девушку по разным галактикам, запретив им встречаться друг с другом. Но голубки оказались умны и смогли соорудить кротовую нору, которая снаружи выглядит как пара черных дыр — одна в галактике Ромео, а другая в галактике Джульетты. Влюбленные решили прыгнуть каждый в свою черную дыру. Для своих семей они все равно что погибли, поскольку с тех пор никто и никогда о них больше не слышал. Незаметная для внешнего мира, геометрия кротовой норы такова, что Ромео и Джульетта встретятся в общей внутренней области, где и будут счастливо жить вместе, пока не рухнет мост, уничтожив их прибежище и убив их обоих.

### Квантовая запутанность

В упомянутой работе Эйнштейна, Розена и Бориса Подольского (впоследствии также сотрудника Института перспективных исследований) 1935 г. помимо кротовых нор обсуждался и другой интересный сюжет — запутывание. Союз этих трех авторов принято обозначать аббревиатурой ЭПР. В своей знаменитой работе ученые пришли к выводу, что квантовая механика допускает существование неких странных корреляций между удаленными физическими объектами — свойство, позднее и названное квантово-механической запутанностью. Корреляция между удаленными объектами может присутствовать в классической физике. Представьте, например, что вы вышли на улицу в одной перчатке, а вторую забыли дома. Перед тем как пошарить в кармане, вы не знаете, правая или левая у вас перчатка. Как только вы увидите, что у вас правая, то немедленно поймете, что дома осталась левая. Запутанность предполагает несколько другую корреляцию, которая существует между величинами, управляемыми законами квантовой механики, — обусловленную принципом неопределенности Гейзенберга. Этот принцип гласит, что существуют пары физических величин, которые невозможно одновременно измерить одинаково точно. Самый известный пример — это одновременное измерение положения и импульса частицы. Чем точнее измеряется положение частицы, тем более неопределенным становится измерение ее скорости, и наоборот. ЭПР задались вопросом: а что произойдет, если будут измеряться скорости или положения отдельных частиц пары, разделенных большим расстоянием?

Мысленный эксперимент, анализируемый ЭПР, заключается в следующем. Пусть две частицы — назовем их Р (Ромео) и Д (Джульетта) — с одинаковыми массами движутся в одномерном пространстве. Можно априори считать, что координата положения центра масс пары частиц точно определена. Обозначим эту координату  $x_{ц.м.}$ , которая есть сумма координат частиц Р и Д. Без ограничения общности можно «посадить» частицы симметрично относительно начала координат, и тогда координата их центра масс будет равна нулю,  $x_{ц.м.} = 0$ . Кроме того, мы можем априори задать и точную относительную скорость частиц,  $v_0$ , которая есть разность скорости Ромео и скорости Джульетты:  $v_0 = v_p - v_d$ . Другими словами, разность двух скоростей должна оставаться постоянной. Важно отметить, что, несмотря на однозначное задание положения и скорости в этом мысленном эксперименте, принцип неопределенности Гейзенберга не нарушен, потому что положение и скорость заданы

не для одиночного объекта. Если есть две частицы, то формально нет запрета на одновременное знание точного положения первой частицы и точной скорости второй частицы. Точно так же, фиксируя положение центра масс, нельзя указать точную скорость центра масс, но реально зафиксировать относительную скорость частиц.

Теперь можно пояснить странность эффекта квантовой запутанности. Предположим, что частицы находятся далеко друг от друга и два удаленных наблюдателя (Ромео и Джульетта) решают измерить координаты этих частиц. Исходя из сформулированных выше начальных условий для частиц, если Джульетта определит какое-либо значение координаты  $x_d$ , то Ромео обнаружит, что его частица обладает координатой, отрицательной

## Принцип неопределенности Гейзенберга гласит, что существуют пары физических величин, которые невозможно одновременно измерить одинаково точно. Чем точнее измеряется положение частицы, тем более неопределенным становится измерение ее скорости, и наоборот

по знаку и равной по модулю значению координаты частицы Джульетты:  $x_p = -x_d$ . Важно заметить, что результат Джульетты случаен, потому что положение ее частицы меняется от измерения к измерению. Результат Ромео фиксирован, потому что полностью определяется результатом Джульетты. Теперь предположим, что и Ромео, и Джульетта измеряют скорости своих частиц. Если Джульетта получает результат  $v_d$  для своей частицы, то Ромео уверен, что скорость его частицы определится как скорость частицы Джульетты плюс относительная скорость ( $v_p = v_d + v_0$ ). Таким образом, результат Ромео снова оказывается строго определенным результатом Джульетты. Конечно, они вольны выбирать, какую именно переменную измерять. В частности, если Джульетта измеряет положение, а Ромео измеряет скорость, то их результаты будут случайными и не продемонстрируют никакой корреляции.

Даже если положение и скорость частицы, измеренные Ромео, подчиняются принципу неопределенности Гейзенберга, в рассматриваемой схеме появляется одна странность. Так, если Джульетта

решил измерить положение своей частицы, то положение частицы ее избранника станет совершенно определенным, как только он узнает результат своей подруги. И то же самое для скорости. Получается, как только Джульетта измеряет положение своей частицы, то частица Ромео тут же «узнает», что тоже «должна» иметь точно определенную координату и неопределенную скорость, и наоборот, измерь Джульетта скорость своей частицы. На первый взгляд происходящее говорит о том, что существует мгновенная передача информации. Девушка может измерить положение частицы, и тогда юноша увидит определенное положение и своей частицы — узнав, таким образом, что Джульетта измеряла именно положение частицы. Ромео не смог бы определить положение своей частицы, если бы не знал результата измерения Джульет-

## **В 1974 г. Стивен Хокинг показал, что квантовые эффекты способны вызывать испускание частиц черными дырами. Традиционное представление о том, что ничто не может покинуть черную дыру, оказалось слишком упрощенным**

ты. Таким образом, корреляции, вызванные квантовой запутанностью, не могут быть использованы для посылки сигнала быстрее скорости света.

Несмотря на то что существование эффекта запутанности было подтверждено экспериментально, оно может показаться просто экзотическим свойством квантовых систем. Однако в последние два десятилетия квантовые корреляции привели к большому числу практических приложений, в том числе к осуществлению прорывов в таких областях, как криптография и квантовые вычисления.

### **Эквивалентность**

Какая связь может быть у двух очень разных странных явлений — кротовой норы и квантовой запутанности? Путь к ответу помогут указать черные дыры. В 1974 г. Стивен Хокинг показал, что квантовые эффекты способны вызывать «испарение» черных дыр, то есть испускание ими частиц (как у обыкновенных горячих объектов). Традиционное представление о том, что ничто не может покинуть черную дыру, оказалось слишком упрощенным. Факт излучения означал наличие температуры — новой характеристики черной дыры.

С XIX в. физикам было известно, что температура связана с движением микроскопических составляющих системы. Например, в газе температура повышается из-за возбуждения молекул. Таким образом, если у черных дыр есть температура, то можно ожидать наличия у них каких-то микроскопических составляющих, в своей совокупности принимающих разные конфигурации или так называемые микросостояния. Кроме того, считается, что черные дыры должны вести себя как квантовые системы, по крайней мере со стороны. Другими словами, черные дыры должны подчиняться законам квантовой механики. Наблюдая черную дыру снаружи, мы ожидаем увидеть систему, имеющую множество микросостояний и с равной вероятностью среди всех других возможностью находиться в любой конфигурации.

Поскольку внешне черные дыры выглядят как обыкновенные квантовые системы, формально можно ввести в рассмотрение «запутанную» пару этих объектов, подобно тому как это было сделано для частиц Ромео и Джульетты. Рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Пусть существует несколько очень удаленных друг от друга черных дыр. Каждая из них обладает большим числом микроскопических квантовых состояний. Теперь представим себе запутанную пару черных дыр. В этой паре каждое квантовое состояние первой черной дыры коррелирует с соответствующим кван-

товым состоянием второй черной дыры. В частности, если мы измеряем конкретное состояние первой черной дыры, то вторая черная дыра обязана иметь в точности то же самое состояние. Интересно то, что, исходя из некоторых соображений, обоснованных теорией суперструн (одним из подходов к построению теории квантовой гравитации), можно утверждать, что пара черных дыр с микросостояниями, находящимися в квантовой запутанности (сформулированной ЭПР), порождает пространство-время с кротовой норой, соединяющей внутренние части обеих черных дыр (ЭР-мост). Другими словами, квантовая запутанность создает геометрическую связь между двумя черными дырами. Этот результат очень неожиданный, потому что квантовая запутанность считалась порождающей корреляции без физической связи. В этом же случае оказывается, что внутренние области двух черных дыр связаны с помощью кротовой норы.

Леонард Сасскинд (Leonard Susskind) из Стэнфордского университета и автор этой статьи назвали эквивалентность кротовой норы и запутанности «ЭР = ЭПР» (из-за связи написанных в 1935 г. двух статей Эйнштейна и его коллег). С позиции

ЭПР наблюдения вблизи горизонтов каждой черной дыры рассматриваемой пары коррелированы, потому что черные дыры находятся в состоянии квантовой запутанности. Согласно точке зрения ЭР, наблюдения коррелируют потому, что черные дыры соединены кротовой норой. Возвращаясь к научно-фантастической истории о Ромео и Джульетте, можно сказать, что влюбленные должны сделать, чтобы сформировать пару запутанных черных дыр для образования кротовой норы. Сначала им нужно создать много пар запутанных частиц, таких как обсуждались выше, и раздать друг другу по частице каждой пары. Затем влюбленным нужно построить очень сложные квантовые компьютеры, которые начнут манипулировать каждой своей группой частиц, объединяя их контролируемым образом и создавая пару запутанных черных дыр. Совершить такой подвиг на практике чрезвычайно трудно, но возможно по законам физики. Кроме того, уже говорилось, что и Ромео, и Джульетта были очень смысленными молодыми людьми.

### Всеобщий принцип

Идеи, к которым мы пришли, разрабатывались учеными на протяжении многих лет, начиная со статьи 1976 г. Вернера Израэля (Werner Israel), позже сотрудника Альбертского университета (Канада). Следует отметить интересную работу 2006 г. о связи запутывания и геометрии, написанную Шинсеем Рю (Shinsei Ryu) и Тадаши Такаянагой (Tadashi Takayanaga), позже сотрудниками Калифорнийского университета в Санта-Барбаре. Сасскинд и автор настоящей статьи заинтересовались исследованиями, опубликованными в 2012 г. Ахмедом Альмхейри (Ahmed Almheiri), Дональдом Марольфом (Donald Marolf), Джозефом Полчински (Joseph Polchinski) и Джеймсом Салли (James Sully) из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре. Они обнаружили парадокс, связанный с природой внутренних областей запутанных черных дыр. Идея «ЭР = ЭПР», согласно которой внутренняя область кротовой норы связывает черную дыру с другой системой, отчасти снимает парадокс.

Несмотря на то что между кротовыми норами и запутанными состояниями была определена связь с помощью черных дыр, заманчиво выглядит идея о том, что такая связь имеет более общий характер. Другими словами, всякий раз, когда возникает состояние квантовой запутанности, образуется некая геометрическая связь. Такое предположение не должно нарушаться даже в простейшем случае, когда рассматривается система всего из двух частиц. Однако в подобной ситуации пространственная связь может включать

микроскопические квантовые структуры, которые не соответствуют привычному для нас представлению о геометрии. До сих пор неизвестно, как описать геометрию квантового микромира, но запутанность этих структур может послужить генератором пространства-времени. Запутывание можно рассматривать как нить, соединяющую две системы. Когда запутанных частиц становится слишком много, то все ниточки их связей образуют ткань пространства-времени. В такой картине уравнения общей теории относительности управляют соединениями и разрывами этих нитей; квантовая механика становится не просто дополнением к гравитации, а самой сутью построения пространства-времени. Сейчас такая картина представляется диким вымыслом, однако некоторые рассуждения все-таки указывают на ее воз-

## До сих пор неизвестно, как описать геометрию квантового микромира, но запутанность этих структур может послужить генератором пространства-времени

можную правоту. Хочется верить, что, казалось бы, не связанные друг с другом феномены кротовой норы и квантовой запутанности могут оказаться эквивалентными, что эта эквивалентность послужит важной подсказкой для создания теории квантового пространства-времени и что случится долгожданное объединение теории гравитации и квантовой теории. ■

Перевод: О.С. Сажина

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Полчински Д. Огненная грань миров // ВМН, № 5-6, 2015.
- Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen in Physical Review, Vol. 47, No. 10, pages 777–780; May 15, 1935. <http://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.47.777>
- The Particle Problem in the General Theory of Relativity. A. Einstein and N. Rosen in Physical Review, Vol. 48, No. 1, pages 73–77; July 1, 1935. <http://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.48.73>
- Cool Horizons for Entangled Black Holes. J. Maldacena and L. Susskind in Fortschritte der Physik, Vol. 61, No. 9, pages 781–811; September 2013. Доступно онлайн по адресу: <http://arxiv.org/abs/1306.0533>