

февраль 2005 № 2 "В МИРЕ НАУКИ"  
Физика

## СИНГУЛЯРНЫЙ КОМПЬЮТЕР

Сет Ллойд,  
Джек Энджи

**Ученые рассматривают законы физики как компьютерные программы, а Вселенную - как компьютер.**

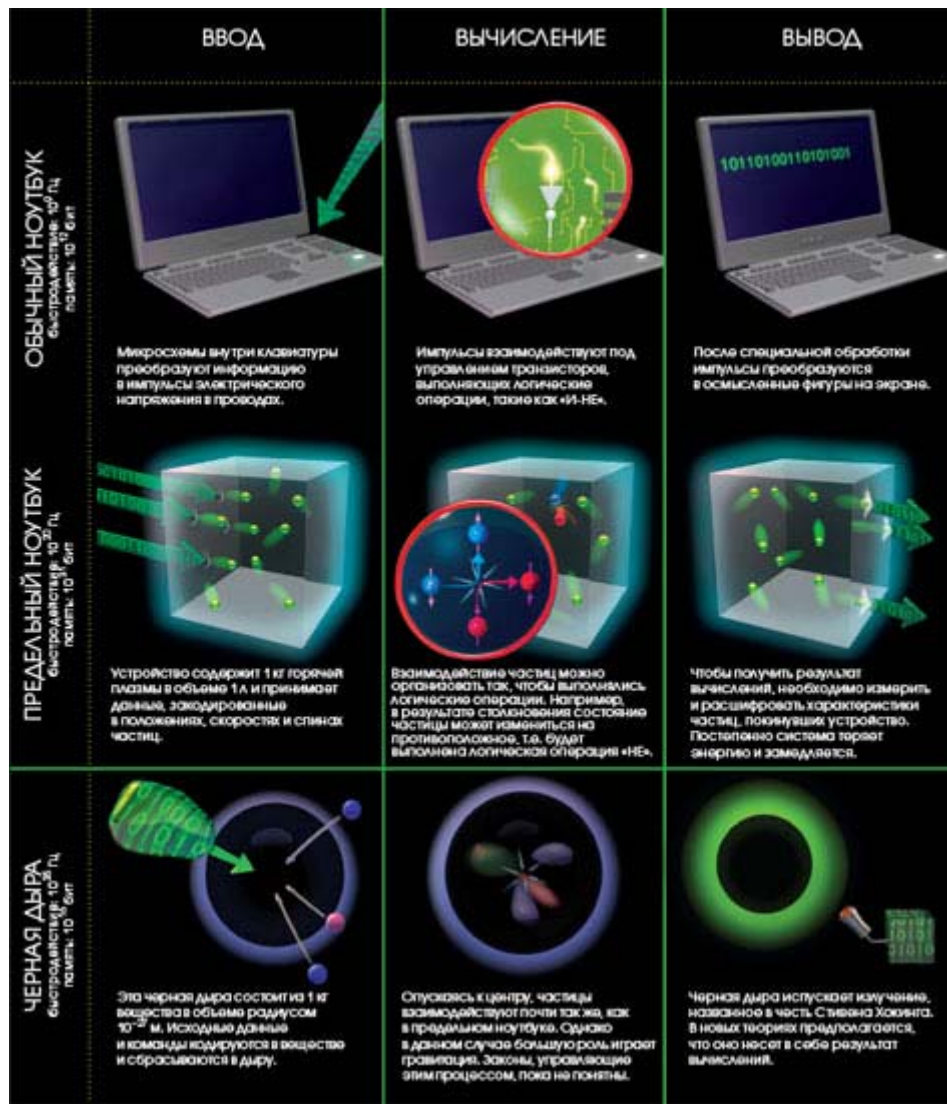
Чем компьютер отличается от черной дыры? Звучит как шутка о Microsoft, но это один из самых серьезных вопросов современной физики. Для большинства людей компьютеры - это красивые коробки на столе или чипы размером с ноготь, размещенные в современной аппаратуре. Но для физика все физические системы - компьютеры. Камни, атомные бомбы и галактики не могут работать под управлением популярных операционных систем, но они регистрируют и обрабатывают информацию. Электроны, фотоны и другие элементарные частицы несут в себе информацию, которая изменяется каждый раз, когда частицы взаимодействуют друг с другом. Физическое существование и информационное содержание неразрывно связаны. Как сказал физик Джон Уилер (John Wheeler) из Принстонского университета, "все - из бита".



Казалось бы, черные дыры должны быть исключением из этого правила. Ввод информации в них не представляет никаких трудностей, но, согласно общей теории относительности, получить ее обратно невозможно. Вещество, входящее в дыру, ассимилируется, и подробности его строения теряются безвозвратно. В 1970-х гг. Стивен Хокинг (Stephen Hawking) из Кембриджского университета показал, что квантовая механика допускает наличие излучения из черных дыр: они светятся, как раскаленный уголь. Однако в ходе анализа, проведенного Хокингом, выяснилось, что излучение носит случайный характер и не несет никакой информации о том, что попало в дыру. Если бы туда провалился слон, возникло бы эквивалентное ему количество энергии, которая, впрочем, была бы мешаниной, и ее никак нельзя было бы использовать для воссоздания животного.

### ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Что такое компьютер? Не только то, что люди обычно называют этим словом, но и вообще все на свете. Физические объекты могут решать логические и математические задачи, хотя и не способны принимать исходные данные и выдавать результат в понятной для людей форме. Природные компьютеры хранят данные в дискретных квантовых состояниях элементарных частиц, а набор выполняемых ими команд определяется законами квантовой физики.



Столь очевидная потеря информации весьма загадочна, потому что по законам квантовой механики информация сохраняется. Другие ученые, в том числе Леонард Зюскинд (Leonard Susskind) из Стэнфордского университета, Джон Прескилл (John Preskill) из Калифорнийского технологического института и Джерард Хоофт (Gerard't Hooft) из Утрехтского университета в Нидерландах, утверждают, что на самом деле испускаемое излучение не случайно, а представляет собой результат информационной обработки упавшего в черную дыру вещества. Прошлым летом Хокинг присоединился к их точке зрения.

Черные дыры - просто самый экзотический пример общего принципа, гласящего, что Вселенная регистрирует и обрабатывает информацию. Сама идея не нова: создатели статистической механики еще в XIX в. для объяснения законов термодинамики придумали то, что позже было названо теорией информации. На первый взгляд, термодинамика и теория информации предельно далеки: первая была разработана для описания паровых двигателей, а вторая - чтобы оптимизировать каналы связи. Тем не менее термодинамическая величина, называемая энтропией, которая ограничивает способность парового двигателя производить полезную работу, оказывается пропорциональной числу битов, регистрируемых положениями и скоростями молекул в веществе. Созданная в XX в. квантовая механика позволила количественно обосновать связь термодинамики с информацией и ввести понятие квантовой информации. Вселенная состоит из квантовых битов - кубитов, обладающих гораздо более интересными свойствами, чем обычные биты.

Анализ Вселенной в терминах битов и байтов не заменяет ее рассмотрения в рамках обычных понятий, таких как сила и энергия, но позволяет выявить новые факты. Например, в статистической механике такой подход позволил разрешить парадокс максвелловского демона, который, казалось бы, допускает существование вечного двигателя. В последние годы физики используют такой анализ для изучения природы черных дыр, тонкой структуры пространства-времени в малых масштабах, космической темной энергии и, наконец, самых глубинных законов природы. Вселенная - не просто гигантский компьютер, а гигантский квантовый компьютер. И, как говорит физик Паола Цицци (Paola Zizzi) из Падуанского университета, "все - из кубита".

### Гигагерц - это слишком медленно

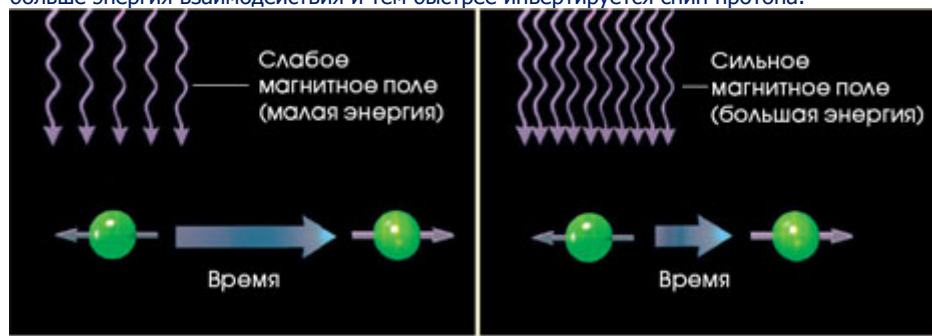
Слияние физики и теории информации обеспечивает главный принцип квантовой механики, гласящий, что в своей основе природа дискретна. Физическую систему можно описать, используя конечное число битов. Каждая частица в ней действует точно так же, как логический элемент компьютера. Спин ("ось") частицы может указывать в одном из двух направлений, кодируя таким образом один бит, и может менять направление на обратное ("опрокидываться"), выполняя таким образом простейшее вычислительное действие.

Система также дискретна во времени: для изменения значения бита требуется минимальный временной промежуток, точная величина которого определяется теоремой, названной в честь пионеров физики обработки информации Нормана Марголуса (Norman Margolus) из Массачусетского технологического института и Льва Левитина (Lev Levitin) из Бостонского университета. Теорема связана с принципом неопределенности Гейзенберга, который описывает присущую природе взаимозависимость физических величин, таких как положение и импульс или время и энергия. Время  $t$ , необходимое для изменения значения бита, зависит от величины прилагаемой энергии  $E$ . Чем она больше, тем короче временной промежуток:

$t >$  или  $= \hbar/4E$ , где  $\hbar$  - постоянная Планка. Например, в одном из прототипов квантового компьютера биты кодируются ориентацией протонов, а для ее изменения используется магнитное поле. Математические операции происходят за минимальное время, допускаемое теоремой Марголуса-Левитина.

### КВАНТОВАЯ АРИФМЕТИКА

Первый закон квантовой арифметики: вычисление потребляет энергию. Спин протона кодирует один бит, который можно инвертировать с помощью магнитного поля. Чем сильнее поле, тем больше энергия взаимодействия и тем быстрее инвертируется спин протона.



У этой теоремы есть множество следствий: от пределов, налагаемых на геометрию пространства-времени, до вычислительных возможностей Вселенной в целом. Рассмотрим пределы вычислительной мощности обычной материи - в данном случае одного килограмма вещества, занимающего объем 1 л. Назовем наше гипотетическое устройство предельным ноутбуком.

Источником питания для него служит просто вещество, непосредственно преобразуемое в энергию по известной формуле  $E = mc^2$ . Если направить всю энергию на управление битами, компьютер сможет выполнять  $10^{51}$  операций в секунду. Объем памяти можно рассчитать с помощью термодинамики. Когда один килограмм вещества превращается в энергию в объеме 1 л, его температура равна 1 млрд. К, а энтропия, пропорциональная энергии, деленной на температуру, соответствует  $10^{31}$  битам информации. Предельный ноутбук хранит данные в виде микроскопических движений и положений элементарных частиц внутри себя. При этом используется каждый отдельный бит, допускаемый законами термодинамики.

Взаимодействуя, частицы могут заставлять друг друга изменять состояние. Этот процесс можно рассматривать в терминах языка программирования типа *C++* или *Java*: частицы - это переменные, а их взаимодействия - арифметические операции. Состояние каждого бита может изменяться  $10^{20}$  раз в секунду, что эквивалентно тактовой частоте процессора в 100 гигагигагерц (т.е. 100 миллиардов миллиардов герц). На самом деле система действует слишком быстро, чтобы ею управлял тактовый генератор. Время, требуемое для изменения состояния бита, приблизительно равно времени, в течение которого распространяется сигнал между двумя соседними частицами. Таким образом, предельный ноутбук работает в предельно параллельном режиме: он действует не как один процессор, а как множество процессоров, работающих почти независимо и сравнительно медленно обменивающихся результатами.

В обычном компьютере содержится один-единственный процессор и приблизительно  $10^{12}$  битов, которые переключаются примерно  $10^9$  раз в секунду. Если закон Мура будет действовать и дальше,

то наши потомки смогут купить предельный ноутбук уже в середине XXIII в. Правда, инженерам придется научиться точно управлять взаимодействиями частиц в плазме, более горячей, чем солнечное ядро, а для программирования компьютера и обработки ошибок понадобится большая часть полосы частот, используемых в системах связи. Кроме того, остро встанет проблема компоновки.

В принципе, такое устройство можно купить уже сегодня (если знать нужных людей). Однокилограммовый кусок вещества, полностью преобразуемого в энергию, - это научное определение 20-мегатонной водородной бомбы. Взрывающееся ядерное оружие обрабатывает огромное количество информации, исходный состав которой задается начальной конфигурацией; результат обработки закодирован в испускаемом излучении.

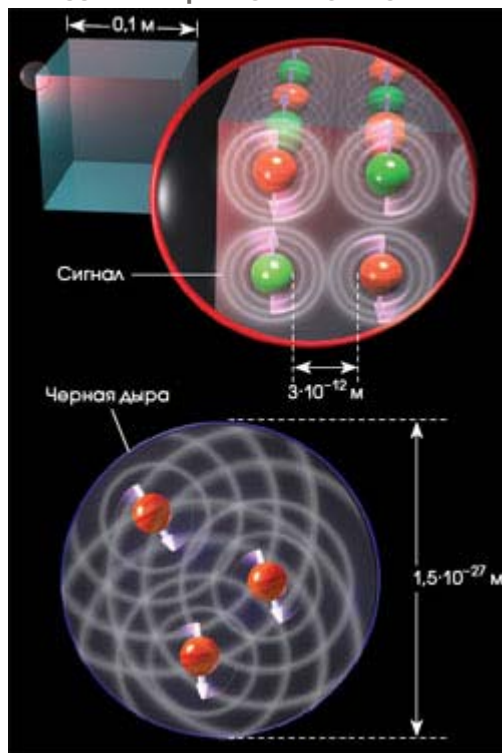
#### От нанотехники к ксенотехнике

Если любой кусок вещества - это компьютер, то черная дыра - это компьютер, сжатый до наименьшего возможного размера. По мере сжатия гравитация становится все больше, и в конечном счете никакой материальный объект не может покинуть его. Размер черной дыры, называемый радиусом Шварцшильда, прямо пропорционален ее массе.

Черная дыра с массой один килограмм имеет радиус около  $10^{-27}$  м. (Для сравнения: радиус протона составляет  $10^{-15}$  м.) Сжатие компьютера не влияет на содержащуюся в нем энергию, так что он, как и прежде, может выполнять  $10^{51}$  операций в секунду. Изменяется емкость памяти. Когда тяготение несущественно, она пропорциональна числу частиц и, таким образом, объему устройства. Но когда гравитация доминирует, она связывает частицы, так что все вместе они способны хранить меньшее количество информации. Полная емкость памяти черной дыры пропорциональна площади ее поверхности. В 1970-х гг. Хокинг и Якоб Бекенштейн (Jacob Bekenstein) из Еврейского университета в Иерусалиме вычислили, что однокилограммовая черная дыра может хранить приблизительно  $10^{16}$  битов, т.е. намного меньше, чем тот же самый компьютер до его сжатия.

Зато черная дыра - намного более быстрый процессор. Фактически время изменения состояния бита,  $10^{-35}$  с, равно времени, которое требуется свету, чтобы пройти от одного края компьютера до другого. Таким образом, в отличие от предельного ноутбука, который выполняет все вычисления параллельно, черная дыра представляет собой последовательный компьютер, в состав которого входит один-единственный процессор.

#### КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРОВ



Предельный ноутбук и сингулярный компьютер представляют собой воплощение двух различных способов увеличения вычислительной мощности. Предельный ноутбук - это идеальный параллельный компьютер, т.е. несметное множество процессоров, работающих одновременно. Черная дыра - это идеальный последовательный компьютер: единственный сверхмощный процессор, выполняющий инструкции по одной.

Предельный ноутбук состоит из набора частиц, которые хранят и обрабатывают биты. Каждая частица выполняет команду за  $10^{-20}$  с. За это время сигнал может пройти не более  $3 \times 10^{-12}$  м. Именно таково среднее расстояние между частицами. Поэтому обмен данными идет значительно медленнее, чем вычисления. Отдельные части компьютера работают почти независимо.

Сингулярный компьютер также состоит из набора частиц. Из-за влияния гравитации они хранят меньшее количество битов. Но на каждый бит приходится больше энергии, и поэтому каждая команда выполняется за  $10^{-35}$  с. За это время сигнал успевает пересечь черную дыру. Поэтому в

данном случае информационный обмен и вычисления идут с одинаковой скоростью. Компьютер работает как единый суперпроцессор.

Как мог бы работать сингулярный компьютер? Ввод данных трудности не составит: их нужно лишь

закодировать в виде вещества или энергии и сбросить в дыру. Готовя должным образом материал, который попадает в дыру, можно запрограммировать ее работу так, чтобы производить любое вычисление. Как только материал входит в дыру, он становится недоступным; роковая черта - так называемый горизонт событий. Упавшие в дыру частицы взаимодействуют между собой, выполняя вычисления за конечное время, пока не достигнут центра дыры, где они перестают существовать. Что происходит с веществом, когда оно сильно сжимается в сингулярность, зависит от деталей квантовой теории гравитации, которые науке пока неизвестны.

Однокилограммовая дыра испускает излучение Хокинга (выходной сигнал), уменьшается в массе и полностью исчезает всего за  $10^{-21}$  с. Длина волны излучения, соответствующая пику интенсивности, равняется радиусу дыры. Для однокилограммовой дыры это соответствует чрезвычайно интенсивному гамма-излучению, которое можно зарегистрировать и расшифровать с помощью детектора частиц.

Результаты, полученные Хокингом, заставляют пересмотреть общепринятое представление о черных дырах как об объектах, из которых вообще ничто не может ускользнуть. Интенсивность, с которой черные дыры излучают, обратно пропорциональна их размерам, так что большие черные дыры, находящиеся в центре галактик, теряют энергию гораздо медленнее, чем поглощают вещество. Однако в будущем ученые, возможно, научатся создавать в ускорителях крошечные черные дыры, которые будут почти сразу же взрываться со вспышкой излучения. Черную дыру можно представить не как неизменный объект, а как короткоживущий сгусток вещества, выполняющий вычисления с максимально возможной в мире скоростью.

### План побега

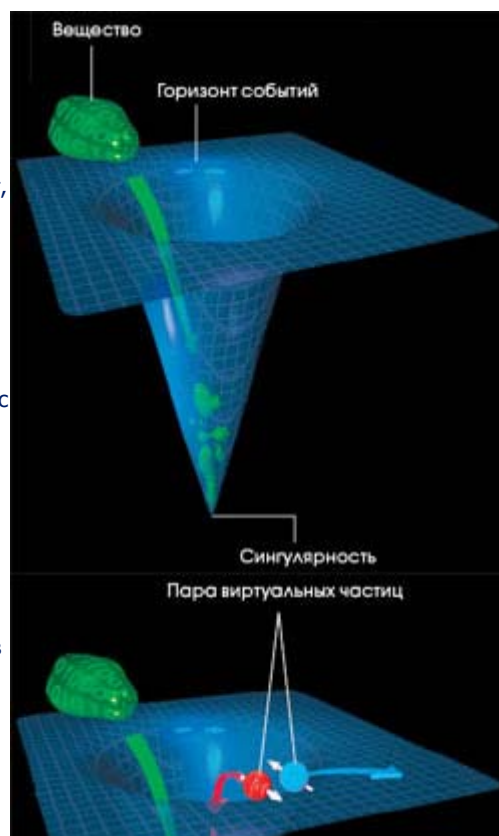
Что же такое излучение Хокинга: результат вычислений или просто шум? Пока трудно сказать, но большинство физиков, включая самого Хокинга, считают это излучение результатом переработки информации, поступившей в дыру в процессе ее формирования. Получается, что вещество не может покинуть черную дыру, а его информационное содержание - может.

В прошлом году Гэри Хоровиц (Gary Horowitz) из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре и Хуан Малдасена (Juan Maldacena) из Института углубленных исследований в Принстоне предположили, что "информационный побег" может обеспечить квантовая сцепленность состояний, при которой свойства двух или нескольких систем остаются коррелированными, несмотря на их удаленность в пространстве и во времени. Сцепленность допускает телепортацию, при которой информация передается от одной частицы к другой с такой точностью, словно частица фактически переносится из одного места в другое со скоростью света.

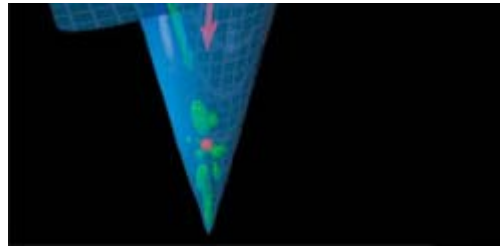
### ЭВОЛЮЦИЯ ТЕОРИИ ЧЕРНЫХ ДЫР

"Объекты настолько плотные, что ничто, даже свет, не может их покинуть". Таково обычное определение черных дыр. Судя по всему, оно не совсем верно. Еще в середине 1970-х гг. физики предположили, что из черной дыры может просочиться энергия. Сегодня многие считают, что наружу также может вырваться и информация (описывающая форму, которую принимает энергия). На диаграммах изображена черная дыра с гипотетической точки зрения, лежащей вне пространства-времени.

**СОГЛАСНО ДОКВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ**, проникнув за внешнюю границу дыры (горизонт событий), ни само вещество, ни сведения о нем не могут покинуть ее. Материя падает в центр дыры (сингулярность), где ее масса ассимилируется, а информация о ней исчезает.

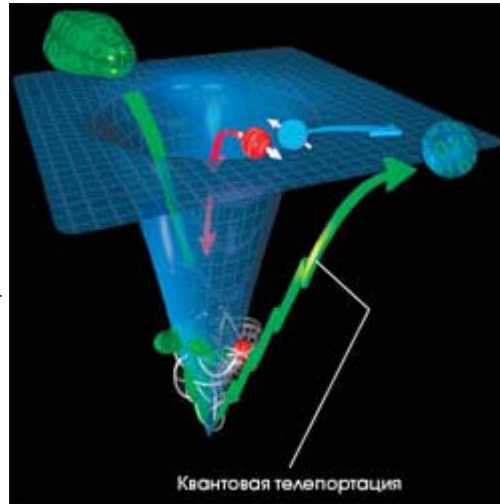


**ХОКИНГ ВПЕРВЫЕ** рассмотрел черную дыру с учетом квантовых эффектов. На горизонте событий материализуются пары виртуальных частиц (*красный и синий шары*). Один член каждой пары, как и прочая материя, падает к сингулярности, а другой устремляется наружу. Спины частиц случайны и не несут никакой информации о веществе, падающем внутрь.



### МОДЕЛЬ ХОРОВИЦА-МАЛДАСЕНА

предполагает, что улетающая частица уносит не только массу, но и информацию. Частица квантово-механически сцеплена с падающим в дыру партнером, который, в свою очередь, сцеплен с другой материей. Сцепление "выносит" информацию о ней наружу.



Чтобы продемонстрировать телепортацию в лаборатории, сначала требуется получить две сцепленные частицы. Затем проводится измерение одной из них совместно с веществом, содержащим информацию, которую нужно передать. Измерение стирает информацию, находящуюся в исходном месте, но из-за сцепленности она в закодированной форме оказывается на второй частице независимо от ее удаленности. Информацию можно извлечь, используя в качестве ключа результаты измерения.

Подобный механизм сработал бы и в черных дырах. Например, на горизонте событий материализуются пары сцепленных фотонов. Один из них летит наружу и становится излучением Хокинга, которое видит наблюдатель. Другой проваливается внутрь и попадает в сингулярность. Исчезновение попавшего в дыру фотона действует как измерение, передавая информацию, содержащуюся в веществе, излучению Хокинга. Отличие от лабораторной телепортации состоит в том, что для декодирования информации результаты "измерения" не нужны. Хоровиц и Малдасена утверждают, что аннигиляция фотона не предлагает разнообразия возможных результатов, т.к. он только один. Наблюдатель, находящийся вне дыры, может вычислить его, используя базовые законы физики, и получить доступ к информации. Этот сценарий не укладывается в рамки обычной квантовой механики, но при всей своей спорности он не лишен здравого смысла. Так же, как начальная сингулярность при возникновении Вселенной, вероятно, имела только одно возможное состояние, не исключено, что конечные сингулярности в черных дырах тоже имеют единственное состояние. В июне 2004 г. Ллойд показал, что механизм Хоровица-Малдасены устойчив и не зависит от конечного состояния, но характеризуется некоторой потерей информации.

Были предложены и другие механизмы "побега", которые также базируются на причудливых квантовых явлениях. В 1996 г. Эндрю Строминджер (Andrew Strominger) и Кумран Вафа (Cumrun Vafa) из Гарвардского университета предположили, что черные дыры состоят из многомерных структур, называемых мембранами. Информация, падающая в черную дыру, сохраняется в виде волн в мембранах и может постепенно просачиваться наружу. Ранее Самир Матхар (Samir Mathur) из Университета штата Огайо и его сотрудники моделировали черную дыру как гигантский клубок струн, представляющий собой склад информации, которую несут объекты, падающие в черную дыру. Дыра же испускает излучение, несущее эту информацию. В одной из последних работ Хокинг утверждает, что квантовые флуктуации препятствуют даже формированию четкого горизонта событий (см. ["Теория Хокинга", "В мире науки", №12, 2004 г.](#)).

### Кибернетическое пространство-время

Свойства черных дыр неразрывно связаны со свойствами пространства-времени. Таким образом, если черные дыры можно рассматривать как компьютеры, то же самое относится непосредственно к пространству-времени. Квантовая механика предсказывает, что пространство-время, как и другие физические системы, дискретно. Расстояния и интервалы времени невозможно измерить с бесконечной точностью, т.к. в малых масштабах пространство-время выглядит как пузыристая пена.

Максимальное количество информации, вмещающееся в некоторую область пространства, зависит от того, насколько малы биты, которые не могут быть меньше ячеек пены пространства-времени.

Физики предполагают, что размер ячеек сопоставим с длиной Планка  $l_p$  (примерно  $10^{-35}$  м). При таких масштабах важны и квантовые колебания, и гравитационные эффекты. Если оценка верна, то нам никогда не удастся непосредственно наблюдать пенистую структуру пространства-времени. Но Энджи, Хендрик ван Дам (Hendrik van Dam) из Университета Северной Каролины в Чепел-Хилл и Фриджис Каролихазы (Frigyes Karolyhazy) из Университета Этвёша Лоранда в Венгрии показали, что ячейки намного больше и к тому же не имеют никакого фиксированного размера: чем больше область пространства-времени, тем больше образующие его ячейки. На первый взгляд, это может показаться парадоксальным, как если бы атомы в слоне были больше, чем в мыши. Ллойд пришел к такому выводу, полагаясь на законы, которые ограничивают производительность компьютеров.

Процесс картирования геометрии пространства-времени - своего рода вычисление, в котором для измерения расстояний используется передача и обработка информации. Представим, что некоторая область пространства заполнена роем спутников Глобальной навигационной системы (GPS), на каждом из которых установлены часы и радиопередатчик. Чтобы измерить расстояние, спутник посылает сигнал и измеряет, сколько времени проходит до его прибытия. Точность измерения зависит от того, как часто тикают часы. Тиканье часов - это тоже вычислительная операция, так что его максимальная частота задается теоремой Марголуса-Левитина, согласно которой время между тиками обратно пропорционально энергии.

### ОБСЧЕТ ПРОСТРАНСТВА - ВРЕМЕНИ

Измерение расстояний и временных интервалов тоже относится к вычислениям и подпадает под те же ограничения, что и компьютеры. Оказывается, измерение - это гораздо более тонкий процесс, чем думали физики.

Чтобы составить карту некоторой области пространства, можно использовать GPS-спутники, которые посылают сигналы и измеряют время их прихода. Для достижения максимальной точности необходимо множество спутников. Впрочем, если их будет слишком много, то вся система коллапсирует в черную дыру.

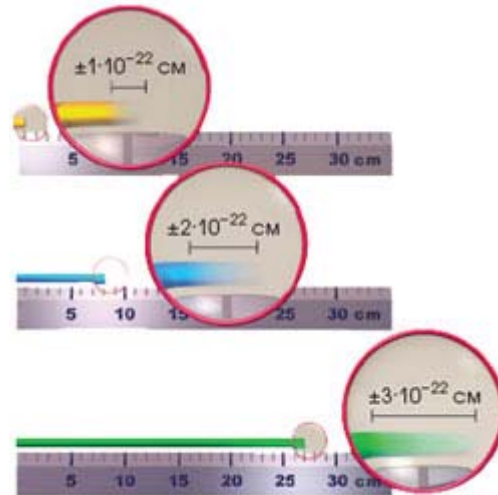


**Радиус: 100 км Спутников:4 Расстояние: 90 км**



**Радиус: 200 км Спутников: 8 Расстояние: 150 км Увеличение погрешности: на 26%**

Чтобы измерить область вдвое большего размера, можно использовать вдвое больше спутников. Но, поскольку объем возрастает в восемь раз, спутники окажутся расположенными дальше друг от друга, и каждому из них придется охватывать большую подобласть. В результате каждому измерению будет уделяться меньше внимания, и общая точность снизится.



Погрешность измерения зависит от размеров измеряемого объекта: чем он крупнее, тем менее четкой становится его структура. Это не согласуется с нашим повседневным опытом, который подсказывает нам, что неточность зависит не от объекта измерения, а от того, насколько мелка шкала линейки. Получается, что выбор объекта измерения влияет на тонкую структуру пространства-времени.

Энергия, в свою очередь, также ограничена. Если вы снабдите спутники слишком большой энергией или разместите их чересчур близко друг к другу, они образуют черную дыру и больше не смогут участвовать в картографировании. (Черная дыра испускает излучение Хокинга, однако его нельзя использовать для изучения внутренней структуры дыры, поскольку длина волны сопоставима с ее диаметром.) Максимальная полная энергия такого созвездия спутников пропорциональна радиусу наносимой на карту области.

Таким образом, энергия увеличивается медленнее, чем объем области. По мере того как область становится больше, картограф сталкивается с неизбежным компромиссом: уменьшать плотность спутников (так, что они будут отстоять дальше друг от друга) или уменьшать энергию, доступную каждому из них (так, что их часы будут работать медленнее). В любом случае измерения становятся менее точными. Математически за время, которое требуется для построения карты области с радиусом  $R$ , общее количество тактов, отсчитанных часами на всех спутниках, равно  $R^2/l_p^2$ . Если часы каждого спутника в процессе картографирования срабатывают в точности один раз, то спутники разделены средним расстоянием  $R^{1/3}l_p^{2/3}$ . В одной подобласти можно измерить и меньшие расстояния, но только за счет меньшей точности измерений в некоторой другой подобласти. Этот аргумент применим, даже если пространство расширяется.

По этой формуле вычисляется максимальная точность определения расстояний, которая достигается тогда, когда измерительный прибор находится на грани превращения в черную дыру. В более мелком масштабе геометрия пространства-времени просто прекращает существовать. Уровень погрешности гораздо больше, чем длина Планка, но все же он очень мал. Средняя ошибка измерения размера видимой Вселенной - около  $10^{-15}$  м. Но даже такую неточность можно было бы обнаружить с помощью прецизионного оборудования для измерения расстояний, которое будет использоваться в обсерваториях гравитационных волн.

Для теоретиков этот результат важен прежде всего потому, что он позволяет по-новому взглянуть на черные дыры. Так, Энджи показал, что, приняв во внимание странную зависимость флуктуаций пространства-времени от кубического корня из расстояния, можно еще одним способом вывести формулу Бекенштейна-Хокинга для объема памяти черной дыры. Отсюда же следует и универсальное ограничение на все сингулярные компьютеры: число битов памяти пропорционально квадрату скорости вычислений. Коэффициент пропорциональности, равный  $Gh/c^5$ , математически связывает информацию и частную теорию относительности (где определяющим параметром является скорость света  $c$  с общей теорией относительности (гравитационная постоянная  $G$ ) и квантовой механикой  $h$ . Из полученного результата вытекает и голографический принцип, согласно которому наша трехмерная Вселенная на самом деле двумерна. Максимальное количество



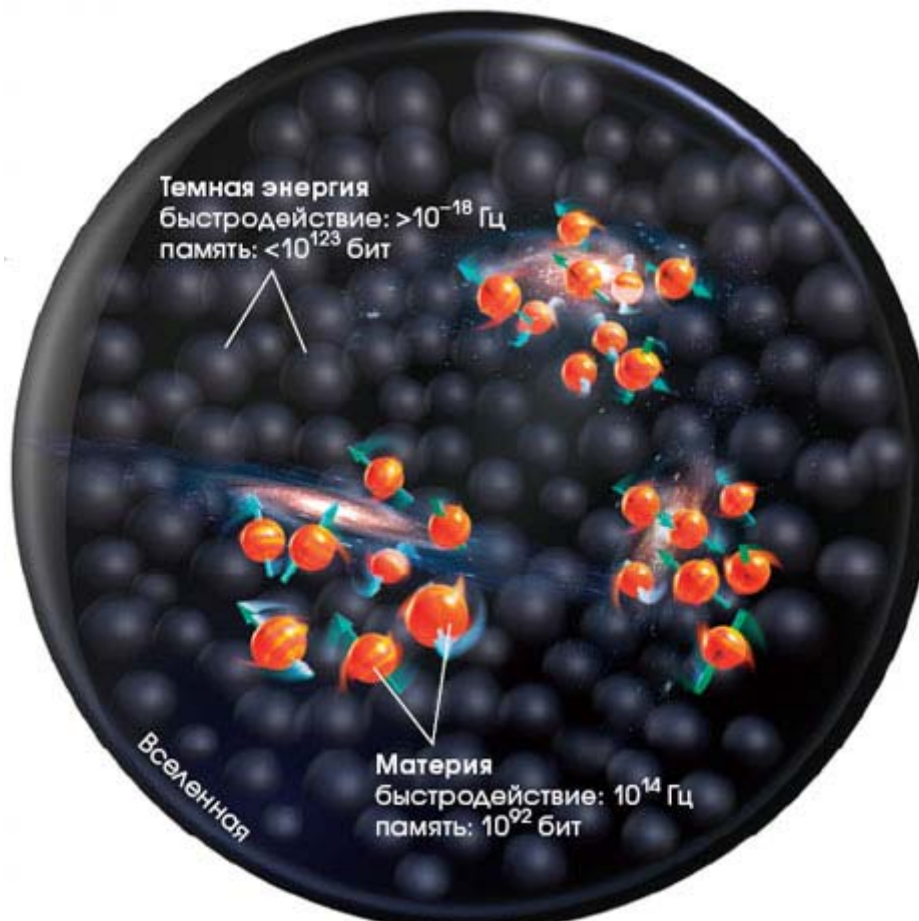
информации, которое может хранить любая область пространства, по-видимому, пропорционально не объему, а площади ее поверхности (см. "Информация в голографической Вселенной", "В мире науки", №11, 2003 г.). Считается, что голографический принцип связан с неизвестными деталями квантовой теории гравитации, однако его можно рассматривать и как следствие фундаментальных квантовых пределов точности измерений.

#### Ответ: 42

Принципы вычислений можно применить не только к самым компактным (черные дыры) и самым крошечным (пена пространства-времени) компьютерам, но и к величайшему среди них - к Вселенной. Вселенная вполне может быть бесконечной в пространстве, но она существует в течение конечного отрезка времени, по крайней мере - в ее существующей форме. Наблюдаемая ее часть в настоящее время составляет в поперечнике несколько десятков миллиардов световых лет. Чтобы мы могли узнать результаты вычислений, все должно происходить в пределах этого пространства.

Из приведенного выше анализа тиканья часов следует, что за время существования Вселенной в ней могло быть выполнено не более  $10^{123}$  действий. Сопоставьте этот предел с поведением видимой материи, темной материи и так называемой темной энергии, которая заставляет Вселенную расширяться со все возрастающей скоростью. Наблюдаемая космическая плотность энергии - около  $10^{-9}$  Дж/м<sup>3</sup>, так что Вселенная содержит  $10^{72}$  Дж энергии. Согласно теореме Марголуса-Левитина, Вселенная может выполнять до  $10^{106}$  действий в секунду, что и дает общее количество действий  $10^{123}$  за все время ее существования. Иными словами, Вселенная выполнила максимально возможное число действий, допускаемое законами физики.

Чтобы вычислить полную емкость памяти обычной материи, можно применить стандартные методы статистической механики и космологии. Материя может вмещать наибольшее количество информации, когда она преобразована в частицы без массы с высокой энергией типа нейтрино или фотонов, плотность энтропии которых пропорциональна кубу их температуры. Плотность энергии частиц (определяющая число действий, которое они могут исполнить) зависит от четвертой степени их температуры. Поэтому общее количество битов равно числу операций, возведенному в степень три четверти. Для Вселенной в целом это составляет  $10^{92}$  бит. Если частицы содержат некоторую внутреннюю структуру, число битов могло бы быть несколько выше. Эти биты переключаются быстрее, чем общаются между собой, так что обычная материя - в высокой степени параллельный компьютер, подобный предельному ноутбуку и отличающийся от черной дыры.



Вселенная - это компьютер, состоящий из двух типов компонентов. Материя (красная) очень динамична и работает как быстродействующий параллельный компьютер. Темная энергия (серая), наоборот, статична: она функционирует как последовательный компьютер с меньшим быстродействием. *Computo, ergo sum.*  
(Вычисляю - значит, существую.)

---

Что же касается темной энергии, физики пока не знают, что это такое, не говоря уже о том, как вычислить, сколько информации она может хранить. Но в голографическом принципе подразумевается, что Вселенная может хранить максимум  $10^{123}$  бита - почти то же самое, что и общее число операций. Это приблизительное равенство - не случайное совпадение. Наша Вселенная близка к ее критической плотности. Если бы плотность была немного больше, Вселенная, возможно, испытала бы гравитационный коллапс, точно так же, как материя, падающая в черную дыру. Так что выполняются (или почти выполняются) условия для приближения к максимуму числа вычислений. Это максимальное число равно  $R^2/l_p^2$ , которое является тем же самым, что и число битов, даваемое голографическим принципом. В каждой эпохе ее истории максимальное число битов, которые Вселенная может содержать, приблизительно равно числу действий, которые она, возможно, выполнила до этого момента.

Принимая во внимание, что обычная материя подвергается огромному числу операций, темная энергия ведет себя совершенно иначе. Если она кодирует максимальное число битов, допускаемых голографическим принципом, то у подавляющего их большинства в течение всей космической истории хватило времени только на то, чтобы изменить состояние не больше одного раза. Так что эти необычные биты - простые зрители вычислений, выполняемых с гораздо более высокими скоростями меньшим числом обычных битов. Независимо от того, что представляет собой темная энергия, она не выполняет большого количества вычислений и не должна этого делать. Ее назначение - обеспечение недостающей массы Вселенной и ускорения ее расширения - простые в вычислительном отношении задачи.

Что же Вселенная вычисляет? Насколько мы можем судить, она не ищет ответа на единственный вопрос, подобно гигантскому компьютеру из "Путеводителя для путешествующих автостопом по Галактике" Дугласа Адамса. Вместо этого Вселенная вычисляет сама себя. Управляемая "программным обеспечением" Стандартной модели элементарных частиц и взаимодействий, Вселенная вычисляет квантовые поля, химические соединения, бактерии, людей, звезды и галактики. И, вычисляя, она отображает свою геометрию пространства-времени с предельной точностью, допускаемой законами физики. Вычисление и есть ее существование.

Эти результаты распространяются на обычные компьютеры, на черные дыры, на пену пространства-времени и на весь Космос, доказывая собой единство природы. Они демонстрируют взаимосвязи общих представлений фундаментальной физики. Хотя физики еще не обладают полной квантовой теорией гравитации, но какова бы ни была эта теория, она глубоко связана с квантовой информацией. Все из кубита.

---

#### ОБ АВТОРАХ:

**Сет Ллойд** (Seth Lloyd) и **Джек Энджи** (Y. Jack NG) посвятили себя двум самым захватывающим областям теоретических исследований: квантовой теории информации и квантовой теории гравитации. Ллойд, занимающий пост профессора квантовомеханической технологии в Массачусетском технологическом институте, создал первый в мире квантовый компьютер. Профессор физики из Университета Северной Каролины Энджи занимается изучением фундаментальной природы пространства-времени. Он предложил несколько способов экспериментального обнаружения квантовой структуры пространства-времени.

---

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

- Ultimate Physical Limits to Computation. Seth Lloyd in Nature, Vol. 406, pages 1047-1054; August 31, 2000. Preprint available at [arxiv.org/abs/quant-ph/9908043](http://arxiv.org/abs/quant-ph/9908043)
- From Computation to Black Holes and Space-Time Foam. Y. Jack Ng in Physical Review Letters, Vol. 86, No. 14, pages 2946 -2949; April 2,2001. Erratum, Vol. 88, No. 13, article 139902(E); March 14,2002. [gr-qc/0006105](http://arxiv.org/abs/gr-qc/0006105)
- Computational Capacity of the Universe. Seth Lloyd in Physical Review Letters, Vol. 88, No. 23, article 237901Z; June 10,2002. [quant-ph/0110141](http://arxiv.org/abs/quant-ph/0110141)
- The Black Hole Final State. Gary T. Horowitz and Juan Maldacena in Journal of High Energy Physics, JHEP02 (2004) 008, 2004. [hep-th/0310281](http://arxiv.org/abs/hep-th/0310281)
- Information: The New Language of Science. Hans Christian von Baeyer. Harvard University Press, 2004.

© [В МИРЕ НАУКИ](#)  
© [SCIENTIFIC AMERICAN](#)



105005 Москва, ул. Радио д.22, к 409  
Телефон (095) 105-03-72  
Тел/факс (095) 105-03-83  
[info@sciam.ru](mailto:info@sciam.ru)