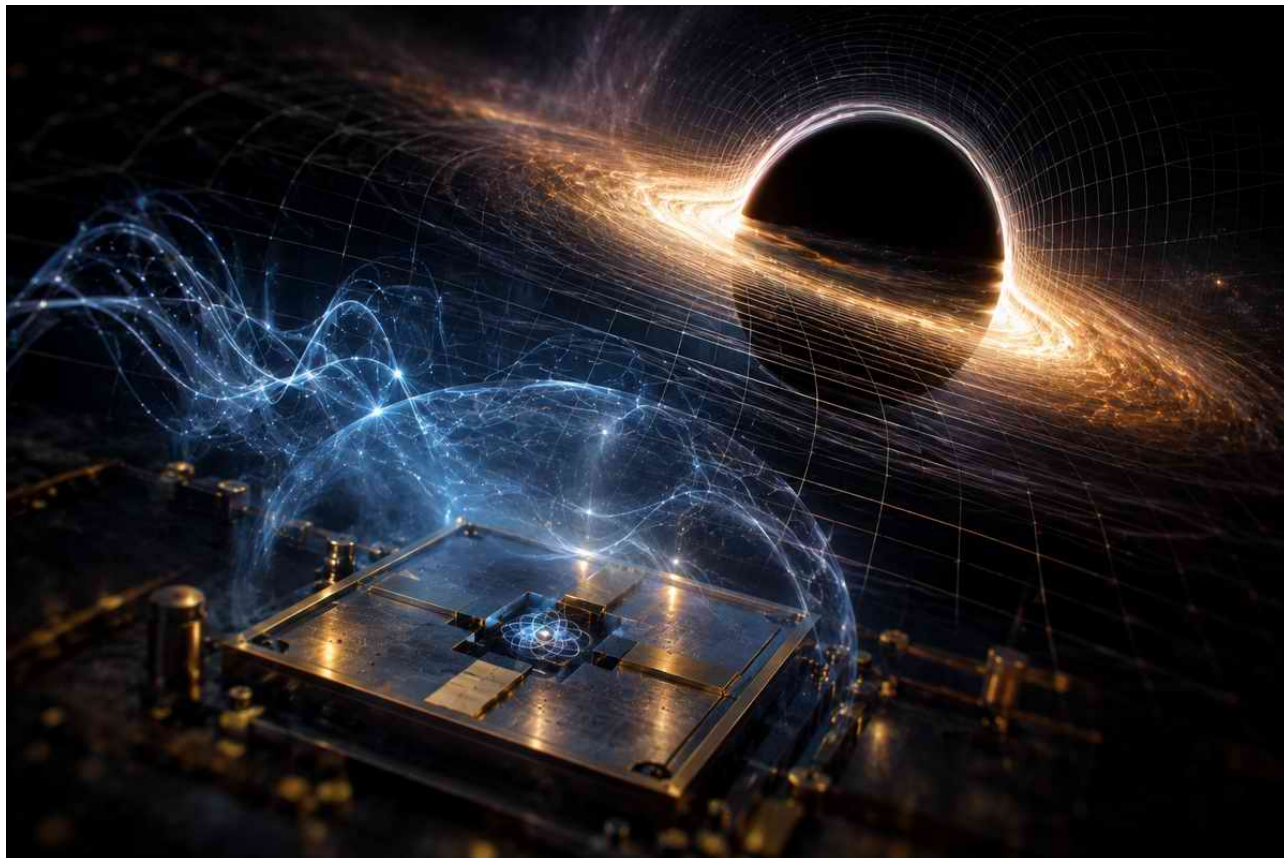


Что происходит с квантовыми устройствами рядом с черной дырой: ученые нашли неожиданный ответ



Дата публикации: 27.07.2026

Черные дыры остаются одними из самых загадочных объектов во Вселенной. Их колоссальная гравитация настолько сильно искривляет пространство-время, что привычные представления о времени, энергии и движении начинают работать иначе. Именно в таких экстремальных условиях ученые пытаются проверить, насколько хорошо между собой согласуются две величайшие физические теории современности — квантовая механика и общая теория относительности. Новое исследование показало, что даже рядом с черной дырой фундаментальные квантовые законы остаются неизменными, однако гравитация существенно меняет то, как эти процессы воспринимает удаленный наблюдатель.

Работа опубликована в журнале *Journal of High Energy Physics* и посвящена одному из наиболее точных квантовых устройств современной физики — джозефсоновскому переходу. Несмотря на сравнительно простую конструкцию, именно этот элемент лежит в основе множества высокоточных измерительных

технологий и считается одним из важнейших инструментов современной квантовой электроники.

Джозефсоновский переход представляет собой два сверхпроводника, разделенные чрезвычайно тонким изолирующим барьером. Благодаря квантовому туннелированию пары электронов способны проходить через этот барьер без сопротивления. При определенных условиях устройство преобразует электрическое напряжение в строго определенную частоту колебаний, что позволяет использовать его как исключительно точный квантовый эталон напряжения и времени.

На основе нескольких подобных переходов создаются сверхпроводящие квантовые интерферометры, более известные как СКВИДы. Эти приборы способны измерять настолько слабые магнитные поля, что находят применение в медицине, фундаментальной физике, геологии, материаловедении и квантовых вычислениях.

Исследователи решили задать необычный вопрос: что произойдет, если подобное квантовое устройство мысленно разместить вблизи невращающейся черной дыры? Будут ли изменены сами законы квантовой физики или изменится лишь способ наблюдения за ними?

На первый взгляд может показаться, что сильнейшая гравитация должна каким-либо образом нарушить работу сверхпроводящего устройства. Однако расчеты показали совершенно иную картину.

Основной вывод исследования заключается в том, что локальная физика джозефсоновского перехода остается полностью неизменной. Все фундаментальные квантовые процессы происходят так же, как и в обычной лаборатории на Земле. Не изменяются ни механизмы сверхпроводимости, ни соотношения Джозефсона, ни сама природа квантовой когерентности.

Изменяется совсем другое — способ измерения этих процессов удаленным наблюдателем. Причина связана с одним из наиболее известных эффектов общей теории относительности — гравитационным красным смещением. Согласно Эйнштейну, время течет с разной скоростью в зависимости от силы гравитационного поля. Чем ближе объект находится к массивному телу, тем медленнее идут его часы относительно часов наблюдателя, расположенного далеко от источника гравитации.

Это различие влияет практически на все измеряемые величины. Частота колебаний, энергия квантовых состояний, электрическое напряжение и даже мощность устройства начинают выглядеть иначе для удаленного наблюдателя, хотя локально никаких изменений не происходит.

Для описания этого эффекта ученые использовали коэффициент гравитационного красного смещения, который принято обозначать греческой буквой α . На большом расстоянии от черной дыры его значение близко к единице, однако по мере приближения к горизонту событий оно постепенно уменьшается и стремится к нулю.

Именно этот коэффициент определяет различия между тем, что измеряет локальный исследователь рядом с прибором, и тем, что увидит наблюдатель, находящийся далеко от черной дыры.

Расчеты показали, что измеряемый критический ток уменьшается пропорционально одному коэффициенту красного смещения, тогда как мощность устройства снижается значительно быстрее, поскольку зависит уже от квадрата этого коэффициента. Иными словами, чем ближе квантовое устройство находится к горизонту событий, тем слабее оно будет казаться удаленному наблюдателю, несмотря на полностью неизменную внутреннюю работу.

Не менее интересными оказались результаты моделирования сверхпроводящего квантового интерферометра. Ученые исследовали, как изменится характер интерференционной картины, если отдельные элементы устройства будут расположены на немного разных расстояниях от черной дыры.

Можно было ожидать, что сильная гравитация приведет к заметному смещению всей интерференционной структуры. Однако вычисления показали более тонкий эффект. Основные максимумы интерференции практически не меняют своего положения. Вместо этого изменяется главным образом амплитуда сигнала, тогда как форма интерференционной картины испытывает лишь небольшие деформации.

Авторы также рассмотрели поведение устройства при воздействии радиочастотных сигналов. Оказалось, что характерные ступени Шапиро сохраняют свое положение, если параметры задаются относительно удаленного наблюдателя. Видимые изменения возникают преимущественно из-за различной скорости распространения сигналов в искривленном пространстве-времени, а не вследствие изменения самих квантовых процессов.

Особенно наглядными становятся эффекты в непосредственной близости от горизонта событий. По мере приближения к нему коэффициент красного смещения стремится к нулю, вследствие чего удаленный наблюдатель фиксирует практически исчезающий ток, чрезвычайно слабую мощность и все более длительные задержки распространения сигнала. При этом локально устройство продолжает работать совершенно нормально.

Исследователи подчеркивают важное ограничение своей работы.

Рассматриваемая модель представляет собой исключительно теоретический мысленный эксперимент. Реально удерживать квантовый прибор непосредственно возле горизонта событий невозможно, поскольку для этого потребовалось бы бесконечно большое ускорение. Кроме того, размеры самого устройства должны быть значительно меньше масштабов изменения гравитационного поля.

Несмотря на это, подобные модели играют важную роль в современной фундаментальной физике. Они позволяют понять, какие эффекты действительно связаны с изменением физических законов, а какие являются лишь следствием особенностей измерений в искривленном пространстве-времени.

Интересно, что аналогичный эффект существует и на Земле, хотя его величина чрезвычайно мала. Даже при разнице высот около одного метра гравитационное красное смещение составляет примерно одну стомиллионную миллиардной миллиардной доли. Такие изменения значительно меньше чувствительности большинства современных джозефсоновских приборов и практически не влияют на реальные измерения.

Тем не менее развитие квантовой метрологии, сверхточных атомных часов и новых сверхпроводящих технологий постепенно приближает физиков к области, где подобные эффекты смогут экспериментально учитываться. Кроме того, аналоговые лабораторные системы уже позволяют моделировать некоторые свойства искривленного пространства-времени без необходимости отправлять оборудование к настоящей черной дыре.

Авторы исследования считают, что наиболее важным результатом работы стало четкое разделение двух понятий: локальной квантовой физики и способа регистрации ее результатов удаленным наблюдателем. Такой подход позволяет избежать ошибочного вывода о том, что сильная гравитация изменяет саму сверхпроводимость или нарушает квантовые законы. На самом деле изменяется только система отсчета, относительно которой выполняются измерения.

Полученные результаты имеют значение далеко за пределами одной модели джозефсоновского перехода. Они помогают лучше понять взаимодействие квантовой механики и общей теории относительности, уточняют методы интерпретации наблюдений в экстремальных астрофизических условиях и могут стать основой для будущих исследований квантовых технологий в сильных гравитационных полях. Работа еще раз показывает, что даже рядом с черной дырой фундаментальные законы квантового мира продолжают действовать без изменений, а гравитация влияет прежде всего на то, каким образом эти процессы воспринимаются наблюдателем.

Ссылка: «Эффект Джозефсона в фоновом излучении Шварцшильда» DOI: [10.1007/jhep02\(2026\)006](https://doi.org/10.1007/jhep02(2026)006).