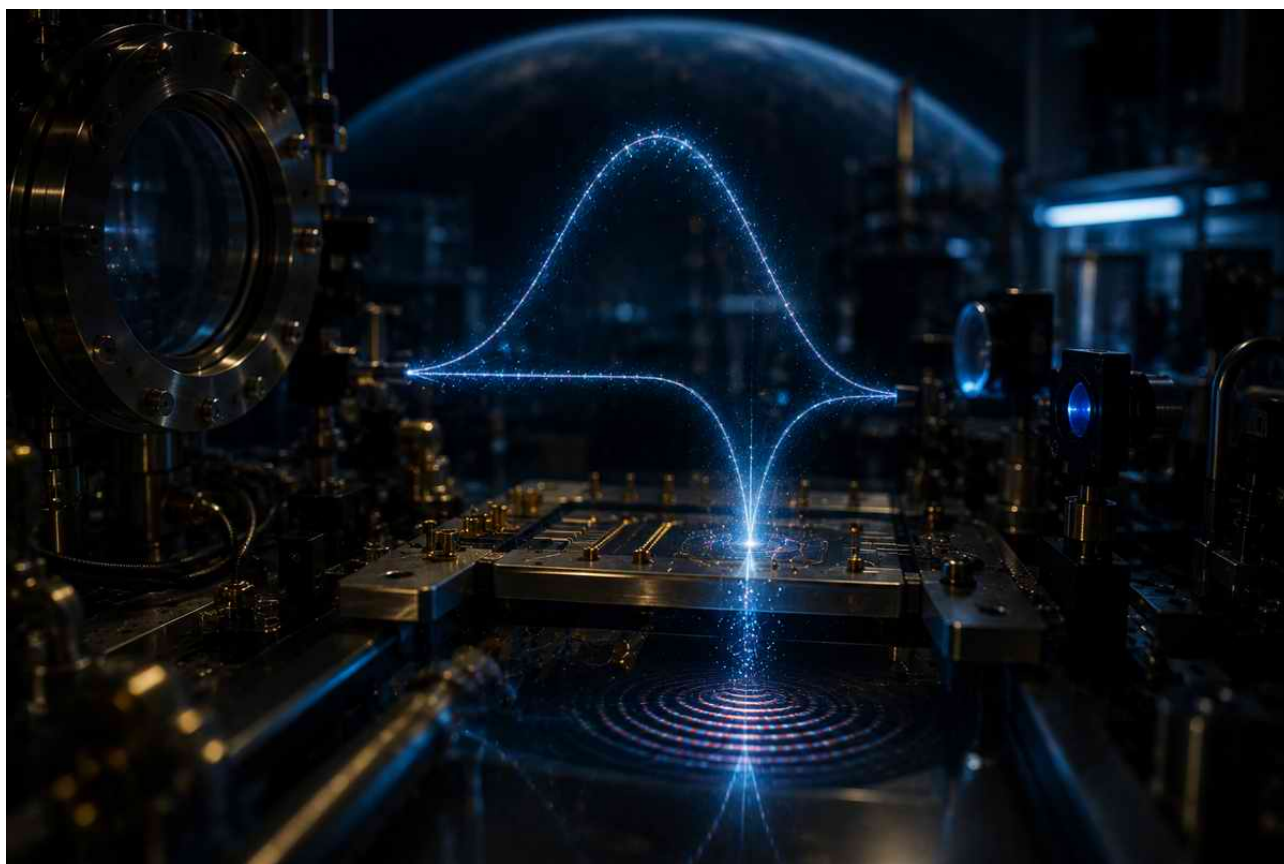


Эйнштейн добрался до квантового мира: атом одновременно падал и оставался на месте



Дата публикации: 03.09.2026

Представьте атом, который бросили вверх и позволили ему упасть под действием земной гравитации. Ничего необычного: в этом отношении атом должен подчиняться тем же законам падения, что камень или теннисный мяч. Теперь добавим квантовую механику. Атом превращается в волну, которую можно подготовить так, чтобы одна ее часть свободно падала, а другая одновременно оставалась неподвижной относительно Земли. Именно такой эксперимент провела международная группа физиков, непосредственно столкнувшись в лаборатории два великих описания природы – квантовую механику и гравитацию Эйнштейна.

Работа исследователей из Университета Бен-Гуриона в Негеве, Оксфордского и Ульмского университетов и других научных центров опубликована в Science Advances. Среди авторов – физик Роджер Пенроуз, лауреат Нобелевской премии 2020 года. Результат оказался одновременно ожидаемым и фундаментально важным: квантовая волна вела себя именно так, как предсказывает применение принципа эквивалентности Эйнштейна.

Проблема взаимодействия гравитации и квантовой механики существует практически столько же, сколько сами современные теории. Общая теория относительности описывает гравитацию как геометрию пространства-времени и великолепно работает для планет, звезд, черных дыр и Вселенной в целом. Квантовая механика столь же успешно описывает атомы и элементарные частицы. Но построить единую проверенную теорию, в которой оба описания естественно сосуществуют на фундаментальном уровне, физика пока не смогла.

Новый эксперимент не решает эту проблему. Вместо этого он задает более конкретный вопрос: что произойдет с квантовым объектом, если буквально применить к нему один из фундаментальных принципов Эйнштейна?

Речь идет о принципе эквивалентности. Его смысл можно представить с помощью знаменитого мысленного эксперимента с лифтом. Если кабина вместе с человеком свободно падает, находящийся внутри наблюдатель локально ощущает невесомость. Все предметы падают вместе с ним, поэтому в небольшой области действие однородной гравитации словно исчезает. Именно эта идея стала одним из отправных пунктов общей теории относительности.

С обычными макроскопическими объектами принцип эквивалентности проверен с огромной точностью. Но квантовый объект обладает особенностью, которой нет у классического мяча: его состояние может находиться в суперпозиции. Грубо говоря, квантовая волна способна распространяться одновременно по нескольким альтернативным путям.

Чтобы использовать это свойство, исследователи создали устройство, названное квантовым интерферометром Галилео. Эксперимент проводили с облаком атомов рубидия, охлажденных почти до абсолютного нуля. При таких температурах тепловое движение сильно подавляется, и квантовыми состояниями атомов можно управлять исключительно точно.

Сначала с помощью микроволновых импульсов атом переводили в суперпозицию внутренних состояний. Это позволяло разделить связанную с ним квантовую волну на две ветви и затем управлять каждой по-разному.

Одну ветвь удерживали относительно лаборатории. Тончайшие проводники атомного чипа создавали магнитное поле, воздействовавшее на выбранное состояние атома. Магнитная сила была настроена так, чтобы практически компенсировать притяжение Земли. Эта часть квантовой волны словно зависала.

Вторая ветвь получала импульс вверх, после чего ее переводили в состояние, почти нечувствительное к управляющему магнитному полю. Она двигалась по баллистической траектории: поднималась, замедлялась и падала обратно под действием гравитации.

Получается необычная картина. Это не два разных атома, один из которых держат, а другой бросают. Эксперимент использует когерентную суперпозицию квантовых состояний одного атомного объекта. Пока одна ветвь волновой функции удерживается, другая переживает свободное падение.

Но как узнать, что с ней произошло? Здесь используется интерференция – один из наиболее характерных квантовых эффектов. В конце эксперимента исследователи снова совмещали две ветви. Подобно двум волнам на поверхности воды, они усиливали или ослабляли друг друга в зависимости от накопленной разницы фаз.

Фаза – не положение атома и не скорость его движения. Ее удобнее представить как положение стрелки невидимых квантовых часов. Две ветви начинают с согласованными часами, проходят разные физические истории, а после встречи ученые проверяют, насколько их стрелки разошлись.

Именно эту разницу исследователи и измерили. Свободно падающая ветвь накопила характерный фазовый сдвиг относительно удерживаемой. Его величина совпала с предсказанием, полученным при применении принципа эквивалентности к квантовой волне.

В этом и заключается основное достижение эксперимента. Квантовая механика не дала неожиданного сбой при столкновении с проверяемым проявлением гравитации. Напротив, наблюдаемое поведение оказалось согласованным с эйнштейновским принципом.

Однако результат легко переоценить. Ученые не создали теорию квантовой гравитации и не доказали, что гравитационное поле само состоит из квантов. В эксперименте Земля по-прежнему выступает источником обычного внешнего гравитационного поля. Квантовым является объект, который в этом поле движется.

Это различие фундаментально. Показать, что квантовая частица правильно реагирует на классическую гравитацию, – не то же самое, что продемонстрировать квантовую природу самой гравитации. Для последнего потребовался бы эксперимент, способный обнаружить свойства гравитационного поля, которые невозможно объяснить классической физикой.

Особую интригу работе придает участие Пенроуза. Он давно рассматривает возможность того, что суперпозиция достаточно массивных объектов может оказаться нестабильной из-за гравитации. Согласно этому направлению рассуждений, квантовая механика может потребовать модификации где-то между микроскопическим миром атомов и привычным миром крупных объектов.

Атомы рубидия слишком легкие, а продолжительность суперпозиции слишком мала, чтобы проверить подобную гипотезу. Поэтому новый эксперимент не подтверждает и не опровергает идеи Пенроуза. Зато созданная техника открывает дорогу к более амбициозным опытам.

Одним из следующих кандидатов могут стать наноалмазы – объекты несравнимо массивнее отдельных атомов, но достаточно маленькие, чтобы пытаться помещать их в квантовые состояния. Если удастся заставить такой объект одновременно следовать различным траекториям в гравитационном поле и сохранить интерференцию, физики приблизятся к территории, где различные представления о взаимоотношениях гравитации и квантовой механики могут начать давать разные предсказания.

Поэтому ценность эксперимента не в сенсационном утверждении, будто квантовая гравитация наконец обнаружена. Наоборот, его сила заключается в точности поставленного вопроса. Физики взяли один из наиболее фундаментальных принципов Эйнштейна, заставили квантовый объект одновременно пережить две разные истории движения и затем позволили этим историям интерферировать.

Пока результат говорит следующее: там, где эксперимент уже способен заглянуть, Эйнштейн и квантовая механика не вступили в конфликт. Но теперь у исследователей появился новый способ двигать границу дальше – от отдельных атомов к все более массивным объектам. Возможно, настоящий сюрприз ожидает физиков именно там, где квантовая волна станет достаточно тяжелой, чтобы гравитация перестала быть просто фоном эксперимента.

Ссылка: «Наблюдение квантовой фазы свободного падения и ее соответствие принципу эквивалентности» DOI: [10.1126/sciadv.aec8045](https://doi.org/10.1126/sciadv.aec8045).