

Оптические атомные часы и релятивистские эффекты: как квантовая механика взаимодействует с искривлением пространства-времени



Дата публикации: 07.03.2025

Физика продолжает искать точки пересечения между двумя фундаментальными теориями — квантовой механикой и общей теорией относительности. Эти две модели описывают Вселенную на разных масштабах, но до сих пор их объединение остается одной из самых сложных задач науки. Новое исследование, проведенное с использованием оптических атомных часов, показывает, как гравитационные эффекты влияют на квантовую запутанность и взаимодействия частиц, что открывает новые перспективы в изучении фундаментальных законов мироздания.

Оптические решетчатые часы — это одни из самых точных инструментов для измерения времени. Они работают на основе ультрахолодных атомов, захваченных лазерными полями, и позволяют фиксировать минимальные изменения в частоте их колебаний. Согласно общей теории относительности, время течет медленнее в сильных гравитационных полях, что приводит к

явлению, известному как гравитационное красное смещение. Этот эффект изменяет частоту атомных колебаний в зависимости от их положения в гравитационном поле, что позволяет ученым измерять малейшие отклонения во времени.

Ранее релятивистские эффекты изучались преимущественно для одиночных атомов, но их влияние на квантовые системы многих тел оставалось неизученным. Новая работа показывает, что взаимодействие гравитации и квантовых эффектов может приводить к неожиданным явлениям, таким как синхронизация атомов и их квантовая запутанность.

Исследователи использовали методы квантовой оптики и термодинамики для анализа взаимодействий между атомами внутри оптической полости. В этой системе атомы могут обмениваться фотонами, что приводит к возникновению коллективных эффектов. Оказалось, что даже небольшие гравитационные сдвиги в частотах отдельных атомов могут значительно влиять на поведение всей системы.

Когда атомы находятся на разных «высотах» в гравитационном поле, их колебания должны становиться несогласованными из-за гравитационного красного смещения. Однако в присутствии фотонных взаимодействий частицы начинают синхронизироваться, несмотря на различия в их индивидуальных частотах. Это удивительное явление показывает, что квантовые взаимодействия могут компенсировать эффекты гравитационного искривления пространства-времени.

Более того, исследователи обнаружили, что это явление не просто приводит к согласованию частот, но и вызывает квантовую запутанность между частицами. Запутанность — это фундаментальное свойство квантовой механики, при котором частицы становятся взаимосвязанными независимо от расстояния между ними. Это означает, что состояние одной частицы мгновенно влияет на другую, даже если они находятся далеко друг от друга.

Для проверки своих выводов ученые разработали уникальные протоколы, позволяющие различать гравитационные эффекты и другие источники частотных изменений, такие как **магнитные поля**. Они использовали метод, известный как «протокол одевания», который позволяет управлять внутренними энергетическими состояниями атомов с помощью лазерного света. Этот метод основан на знаменитом уравнении Эйнштейна ($E = mc^2$), согласно которому внутренняя энергия частицы влияет на ее массу.

В результате ученые смогли искусственно изменять разницу в гравитационных сдвигах атомов, управляя их внутренними состояниями. Это

дало возможность точно измерять влияние гравитации на квантовые системы, а также настраивать параметры для достижения максимальной синхронизации и запутанности.

Полученные результаты открывают новые перспективы для изучения взаимодействия квантовой механики и гравитации. В будущем эти методы могут быть использованы для разработки более точных квантовых часов, исследования гравитационных волн на микроуровне и тестирования гипотез о природе пространства-времени.

Современные технологии уже позволяют изучать тонкие эффекты гравитации в лабораторных условиях, но следующий шаг — создание квантовых систем, способных обнаруживать гравитационные отклонения с беспрецедентной точностью. Экспериментальное подтверждение запутанности, вызванной гравитационными эффектами, станет важным шагом к объединению двух великих теорий — квантовой механики и общей теории относительности.

Ближайшие исследования будут направлены на уточнение механизмов взаимодействия гравитации и квантовых процессов, а также на разработку новых способов управления этими эффектами. Если удастся экспериментально подтвердить гипотезы, выдвинутые в этом исследовании, это может привести к революции в квантовых вычислениях, гравитационной физике и созданию принципиально новых технологий.

Ссылка: «Исследование динамического взаимодействия между эквивалентностью массы и энергии, взаимодействиями и запутанностью в оптических решеточных часах» DOI: [10.1103/PhysRevLett.134.093201](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.093201).