

Физики впервые зафиксировали «отрицательное время» в квантовом эксперименте с фотонами

Дата публикации: 01.05.2026

Квантовая физика вновь поставила ученых перед парадоксом, который еще недавно казался скорее философской загадкой, чем реальным физическим эффектом. Исследователи сумели экспериментально подтвердить явление, которое на языке науки называют «отрицательным временем пребывания» частицы. Речь идет о ситуации, когда фотон, проходя через облако атомов, ведет себя так, будто покидает систему раньше, чем успевает в нее войти.

Результаты работы опубликованы в журнале *Physical Review Letters* и уже вызвали широкий интерес среди специалистов по квантовой механике и фотонике. Несмотря на кажущуюся фантастичность, эксперимент не нарушает теорию относительности и не означает создания машины времени. Однако он показывает, насколько необычным может быть поведение материи и света на квантовом уровне.

Эксперимент проводился с фотонами — квантами света — и облаком атомов рубидия. Рубидий давно используется в квантовой оптике благодаря своим удобным энергетическим уровням. Когда энергия фотона совпадает с энергией перехода атома в возбужденное состояние, возникает так называемый резонанс. В этот момент атом может временно «поглотить» фотон, удерживая его энергию внутри системы, а затем снова испустить ее.

На классическом уровне можно было бы ожидать, что фотон проведет внутри атомного облака некоторое положительное время. Но в квантовой механике действуют иные правила. Из-за принципа неопределенности Гейзенберга частица с точно определенной энергией имеет размытое время появления. Фотон фактически представляет собой длинный волновой импульс, у которого невозможно точно определить момент входа в систему.

Когда исследователи измерили время прохождения фотонов через облако атомов, оказалось, что некоторые фотоны появляются на выходе раньше, чем это допускает обычная интуиция. Если вычислить разницу между предполагаемым временем входа и временем выхода, получается отрицательная величина.

Подобный эффект ученые наблюдали и раньше. Еще в 1993 году физики зафиксировали странное раннее появление фотонов после прохождения через резонансную среду. Однако долгое время это объясняли особенностями формы светового импульса. Считалось, что через облако проходит лишь передняя часть

волны, тогда как остальная энергия рассеивается. В результате создавалось впечатление, будто фотон «ускорился».

Новое исследование пошло гораздо дальше. Физики решили измерить не только время прибытия фотона, но и то, сколько времени его энергия действительно находилась внутри атомного облака. Для этого они использовали метод слабых квантовых измерений.

Такие измерения отличаются от обычных тем, что практически не разрушают квантовую систему. В стандартной квантовой механике сам факт наблюдения изменяет состояние частицы. Если слишком точно отслеживать фотон, можно полностью нарушить его взаимодействие с атомами. Это явление известно как квантовый эффект Зенона, при котором постоянное наблюдение буквально «замораживает» эволюцию системы.

Чтобы избежать этого, исследователи применили слабый лазерный луч, проходящий через облако рубидия. По очень небольшим изменениям фазы света ученые определяли, находились ли атомы в возбужденном состоянии. Один отдельный эксперимент давал почти случайный результат, но усреднение миллионов измерений позволило получить точную статистическую картину.

Именно здесь произошло главное открытие. Время пребывания фотона внутри облака, вычисленное через слабые измерения, оказалось таким же отрицательным, как и время, определенное через раннее прибытие фотона на выходе. Это стало первым прямым подтверждением того, что эффект отрицательного времени не является математическим артефактом или оптической иллюзией.

Фактически квантовая система вела себя так, будто взаимодействие происходило с отрицательной продолжительностью. На языке привычной логики это звучит абсурдно. Но квантовая механика давно показывает, что микромир подчиняется законам, которые не имеют прямых аналогов в повседневной жизни.

Особенно важно, что эксперимент не нарушает причинность. Фотоны не передают информацию быстрее света и не путешествуют в прошлое. Отрицательное время здесь связано не с движением назад по временной оси, а с интерференцией квантовых состояний и необычной структурой вероятностей.

Физики подчеркивают, что подобные эффекты возникают только в очень специфических условиях, связанных с квантовыми измерениями, резонансом и волновой природой частиц. Однако сама возможность наблюдать такие явления в лаборатории открывает новые направления исследований.

Современная квантовая теория все чаще сталкивается с ситуациями, где привычные понятия пространства, времени и причинности начинают работать иначе. Аналогичные парадоксы возникают при изучении туннельного эффекта, квантовой запутанности и поведения частиц в сверхсильных полях.

Некоторые исследователи считают, что подобные эксперименты помогут глубже понять природу времени как физической величины. В классической физике время воспринимается как непрерывный поток событий. Но в квантовом мире оно может оказаться гораздо более сложным и зависимым от самого процесса наблюдения.

Интересно и то, что метод слабых измерений постепенно становится одним из важнейших инструментов современной квантовой физики. С его помощью ученые изучают процессы, которые невозможно увидеть напрямую без разрушения системы. Это особенно важно для разработки квантовых компьютеров, сверхточных сенсоров и новых систем передачи информации.

Отрицательное время также связано с фундаментальным вопросом: насколько объективной является реальность на квантовом уровне. В некоторых интерпретациях квантовой механики свойства частиц не существуют в определенном виде до момента измерения. Эксперимент с фотонами и рубидием показывает, насколько сильно наблюдение связано с самим поведением материи.

Существует мнение, что подобные результаты постепенно подводят физику к необходимости переосмысления самого понятия времени. Возможно, время не является универсальным фоном Вселенной, а представляет собой более сложный квантовый процесс, возникающий из взаимодействия материи, энергии и наблюдения.

Пока эти идеи остаются предметом дискуссий, однако эксперимент уже стал одним из самых необычных подтверждений того, что квантовый мир способен вести себя вопреки человеческой интуиции. Фотоны, словно герои древних мифов, снова продемонстрировали способность обманывать ожидания, оставляя физикам новые загадки о природе реальности, времени и самого устройства Вселенной.

Ссылка: «Экспериментальное наблюдение отрицательных слабых значений времени, которое атомы проводят в возбужденном состоянии при прохождении фотона» DOI: [10.1103/gjfq-k9dv](https://doi.org/10.1103/gjfq-k9dv).