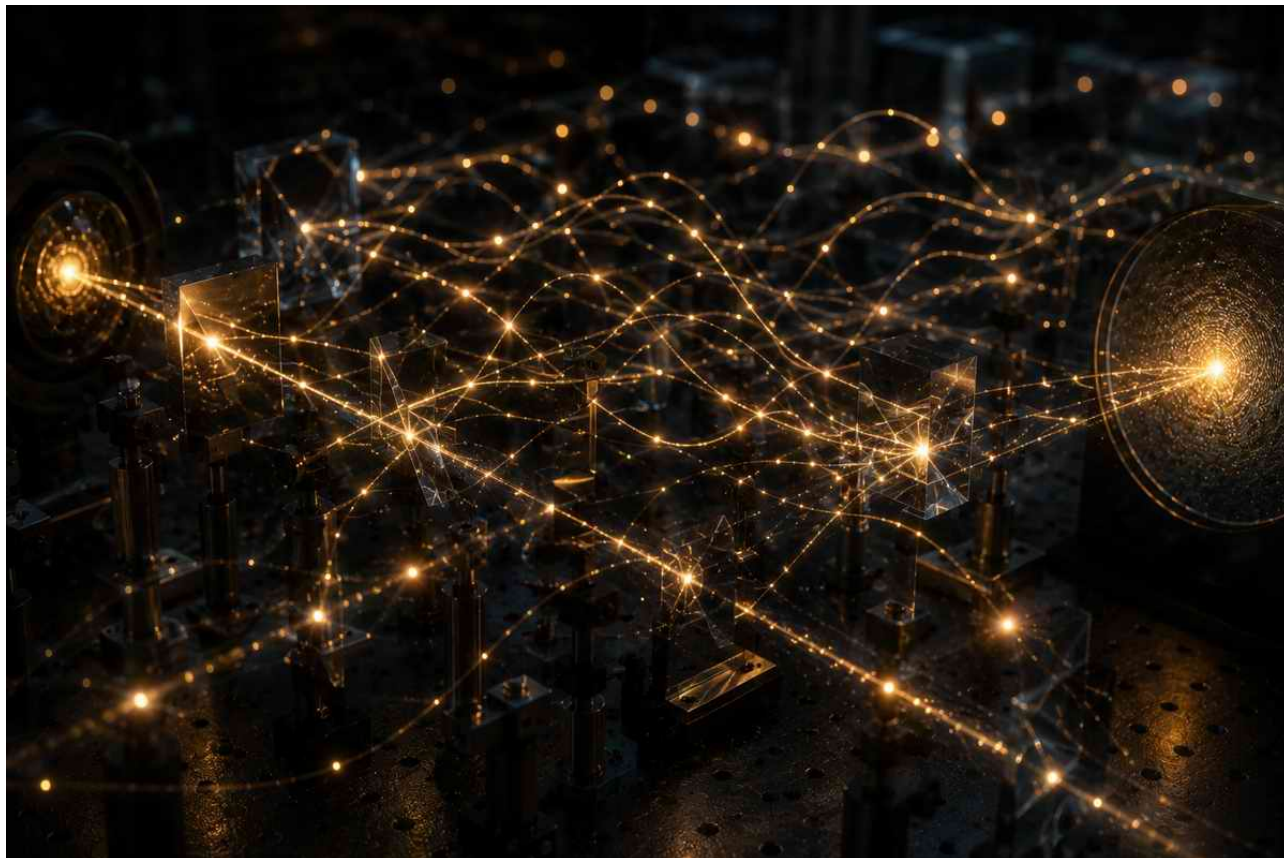


Спустя почти 80 лет физики проверили одну из самых странных идей Фейнмана о квантовом мире



Дата публикации: 01.09.2026

Как частица добирается из одной точки пространства в другую? В повседневном мире вопрос кажется почти бессмысленным: брошенный мяч летит по определенной траектории, автомобиль движется по дороге, а планета обращается вокруг звезды по вычисляемой орбите. Но в квантовом мире Ричард Фейнман предложил совершенно другой ответ. Частица ведет себя так, словно при движении учитываются все возможные пути между начальной и конечной точками одновременно.

Эта идея появилась в конце 1940-х годов и стала одним из наиболее необычных способов описания квантовой механики. Вместо поиска единственной траектории Фейнман предложил математически сложить вклад всех мыслимых маршрутов. Прямой путь, длинный путь, слегка искривленный и совершенно причудливый — каждый должен участвовать в формировании окончательного результата.

Речь, однако, не идет о том, что фотон можно представить крошечным шариком, который буквально разделяется и физически путешествует по миллионам дорог. Квантовая механика оперирует амплитудами вероятности. Каждому возможному пути соответствует комплексная амплитуда с определенной фазой, а наблюдаемая вероятность возникает только после сложения этих вкладов.

Именно здесь появляется знаменитый интеграл по траекториям Фейнмана. Разные пути способны усиливать или подавлять друг друга подобно волнам на поверхности воды. Если их фазы совпадают, вклад усиливается, если расходятся — происходит частичное или практически полное взаимное уничтожение. Из этого огромного множества квантовых возможностей в итоге возникает тот результат, который регистрирует эксперимент.

Метод оказался настолько успешным, что на протяжении десятилетий стал стандартным инструментом теоретической физики. С его помощью рассчитывают процессы в квантовой механике и квантовой теории поля. Но существует существенная разница между тем, чтобы убедиться в правильности конечных предсказаний теории, и тем, чтобы экспериментально реконструировать сами вклады множества путей, лежащие в основе фейнмановской картины.

Именно вторую задачу попыталась решить группа под руководством Ши-Ляна Чжу из Южно-Китайского педагогического университета. Исследователи использовали одиночные фотоны и сложную оптическую установку с зеркалами, линзами и кристаллами. Вместо попытки напрямую посмотреть, какой дорогой прошел каждый фотон, ученые восстанавливали соответствующие квантовые амплитуды.

Это принципиально важно. Если попытаться обычным способом определить траекторию квантового объекта, само измерение изменит эксперимент. Информация о пути способна разрушить интерференционную картину, которую исследователь хотел изучить. Поэтому физикам пришлось извлекать сведения о возможных маршрутах значительно более тонким способом.

В результате команда реконструировала амплитуды приблизительно для 1 419 857 возможных траекторий. Сам масштаб измерения стал серьезной технической проблемой. Крошечная погрешность при определении каждого отдельного вклада при сложении более миллиона результатов могла превратиться в огромную итоговую ошибку. Исследователям пришлось значительно повысить точность экспериментальных процедур, чтобы накопление погрешностей не уничтожило полезный сигнал.

Полученная картина совпала с предсказаниями фейнмановского подхода. Вклады различных траекторий складывались таким образом, что из их интерференции возникала наблюдаемая вероятность. Исследование также подтвердило ожидаемые свойства амплитуд и фаз, связывающие квантовое описание с классической траекторией.

Особенно интересен момент, где квантовый мир словно начинает превращаться в привычный нам классический. Если в интеграле присутствует огромное количество возможных путей, почему летящий предмет в обычной жизни все-таки движется по вполне определенной траектории? Ответ скрывается в фазах.

Для большинства далеких от классического маршрута путей фазы быстро изменяются, поэтому соседние вклады в значительной степени взаимно уничтожаются. Вблизи классической траектории изменение фазы происходит иначе, и вклады способны складываться более согласованно. Поэтому из кажущегося хаоса квантовых возможностей постепенно проявляется путь, знакомый классической физике.

В этом заключается одна из самых красивых особенностей идеи Фейнмана. Классическая механика не обязательно существует отдельно от квантовой как совершенно иной набор правил. В определенном пределе привычное движение может возникать из интерференции огромного множества квантовых возможностей.

При этом эксперимент не означает, что ученые только сейчас доказали правильность квантовой механики или впервые подтвердили интеграл Фейнмана вообще. За десятилетия теория прошла огромное количество чрезвычайно точных косвенных проверок. Новизна работы заключается в возможности экспериментально реконструировать структуру вкладов множества траекторий и непосредственно сопоставить ее с фейнмановским описанием.

Это открывает интересные перспективы. Подобный подход можно попробовать применить к более сложным системам, например к распространению фотонов внутри материалов. Тогда интеграл по траекториям превращается не только в математический способ вычисления результата, но и в экспериментально исследуемую структуру квантовой динамики.

Есть в этой работе и философский оттенок. Фейнмановская картина заставляет отказаться от очень человеческого требования, чтобы у объекта обязательно существовала одна определенная история между двумя наблюдениями. Квантовая теория предлагает вместо этого пространство возможностей, каждая из которых вносит вклад в результат.

Почти восемь десятилетий эта идея прежде всего жила в формулах и прекрасно работающих расчетах. Теперь физики получили возможность экспериментально заглянуть внутрь самой конструкции и проверить, как складываются ее отдельные элементы. И результат оказался именно таким, каким предполагал Фейнман: привычная реальность может возникать не из единственного заранее выбранного пути, а из взаимодействия огромного множества квантовых возможностей.

Ссылка: «Прямая экспериментальная проверка постулатов интеграла по траекториям Фейнмана с помощью одиночных фотонов» DOI: [10.1126/sciadv.aeh1011](https://doi.org/10.1126/sciadv.aeh1011).