

## Эксперимент спустя век подтвердил правоту Бора в споре с Эйнштейном

Дата публикации: 31.12.2025

Реальный эксперимент, выполненный почти через сто лет после знаменитых теоретических споров начала XX века, дал убедительное подтверждение тому, что Нильс Бор был прав в одном из самых принципиальных разногласий с Альбертом Эйнштейном о природе квантового мира. Речь идёт о принципе дополнительности — фундаментальном положении квантовой механики, согласно которому некоторые физические свойства квантовых объектов принципиально невозможно измерить одновременно с произвольной точностью. Этот результат не только укрепляет позиции копенгагенской интерпретации, но и демонстрирует, как философские дискуссии прошлого превращаются в проверяемую экспериментальную физику XXI века.

Исторический контекст этого открытия уходит в эпоху, когда основы квантовой механики только формировались. Нильс Бор и Альберт Эйнштейн неоднократно вступали в публичные и частные дискуссии о том, является ли квантовая теория завершённым описанием реальности. На Сольвеевских конференциях 1920-х годов, особенно на встрече 1927 года в Брюсселе, эти споры приобрели почти легендарный характер. Именно тогда прозвучала знаменитая фраза Эйнштейна о том, что Бог «не играет в кости», отражавшая его неприятие вероятностной природы квантовой механики.

Одним из ключевых аргументов Эйнштейна стал мысленный эксперимент, направленный против принципа дополнительности. Он касался интерференции частиц в установке с щелями и возможности одновременно определить, через какую щель прошла частица, и наблюдать интерференционную картину. В классической интуиции эти два факта не противоречат друг другу, однако квантовая механика утверждает обратное: информация о траектории уничтожает интерференцию. Этот принцип лежит в основе корпускулярно-волнового дуализма, принципа неопределённости Гейзенберга и всей современной квантовой теории.

Эйнштейн предложил усложнённую версию эксперимента с двойной щелью, в которой одна из щелей была закреплена на пружинах и могла передавать информацию об импульсе пролетающей частицы. По его замыслу, измеряя отдачу щели, можно было бы узнать, через какую щель прошла частица, не разрушая интерференционную картину. Если бы это удалось, принцип дополнительности оказался бы под серьёзным вопросом. Бор, в ответ, указал, что само измерение импульса неизбежно приводит к росту неопределённости

положения щели, а значит — к размытию интерференционных полос. В рамках квантовой механики это следствие фундаментальных соотношений неопределённости, а не технических ограничений эксперимента.

Долгое время этот спор оставался в области теоретических рассуждений, поскольку реализовать подобный эксперимент с необходимой точностью было невозможно. Лишь современные технологии квантовой оптики позволили приблизиться к условиям, о которых говорили Бор и Эйнштейн. Такой эксперимент был выполнен группой китайских физиков под руководством Цзянь-Вэя Пана из University of Science and Technology of China, а результаты опубликованы в *Physical Review Letters*.

В роли квантовой «щели» в эксперименте выступал одиночный атом рубидия, удерживаемый оптическим пинцетом — высокоточной ловушкой, созданной сфокусированным лазерным излучением. Частицей, проходящей через эту квантовую щель, был фотон. Атом рубидия предварительно охлаждали до основного состояния в трёхмерном гармоническом потенциале, что позволяло минимизировать его тепловое движение и контролировать неопределённость импульса. В такой конфигурации импульс фотона и импульс атома оказывались квантово запутанными, что полностью соответствует логике аргумента Бора.

Ключевой особенностью эксперимента стало то, что исследователи могли динамически изменять глубину ловушки оптического пинцета. Это позволяло управлять внутренней неопределённостью импульса атома рубидия. При малой неопределённости импульса информация о траектории фотона становилась доступной, но интерференционная картина размывалась. При увеличении неопределённости импульса интерференция восстанавливалась, а информация о «пути» фотона терялась. Результат оказался в полном соответствии с принципом дополнительности и предсказаниями Бора.

Серьёзной технической проблемой оказался нагрев атома, вызванный нестабильностью частоты лазеров, формирующих оптическую ловушку. Этот нагрев мог маскировать чисто квантовые эффекты и вносить классические искажения. Для решения этой задачи команда использовала сканирующую рамановскую спектроскопию в реальном времени, позволяющую измерять остаточную температуру атома и точно калибровать тепловые эффекты. Метод основан на анализе неупругого рассеяния света и позволяет восстановить распределение заселённостей квантовых состояний, подчиняющееся статистике Бозе-Эйнштейна.

С точки зрения современной квантовой теории, как отмечают авторы работы, видимость интерференционной картины напрямую связана со степенью квантовой запутанности между фотоном и «щелью» в импульсном пространстве.

Эксперимент позволил не только подтвердить аргумент Бора, но и наглядно показать границу между квантовым и классическим описанием, а также переходы между когерентным квантовым режимом и декогеренцией.

Хотя принцип дополнительности подтверждался и ранее в различных экспериментах, особая ценность этой работы заключается в том, что она напрямую реализует один из самых известных мысленных экспериментов в истории физики. Это подчёркивает, что даже спустя десятилетия старые философские споры продолжают стимулировать развитие экспериментальных методов и углублять наше понимание квантовой реальности. В дальнейшем исследователи планируют использовать квантовую томографию процессов для восстановления состояния квантовой щели и изучения роли массы, запутанности и декогеренции, что может пролить свет на ещё более фундаментальные вопросы квантовой механики и её связи с классическим миром.

**Ссылка:** «Настраиваемый мысленный эксперимент Эйнштейна-Бора с откатной щелью на квантовом пределе» DOI: [10.1103/93zb-lws3](https://doi.org/10.1103/93zb-lws3).