

Золотое правило Ферми прошло новую проверку: физики выяснили, когда знаменитая формула перестает работать



Дата публикации: 09.07.2026

Золотое правило Ферми уже почти столетие остается одной из фундаментальных формул квантовой механики. Именно оно позволяет вычислять вероятность перехода квантовой системы из одного энергетического состояния в другое под воздействием внешнего возмущения. Несмотря на свою кажущуюся простоту, эта формула лежит в основе огромного количества современных технологий — от работы полупроводников и лазеров до методов спектроскопии, квантовых вычислений и ускорителей элементарных частиц.

Новое исследование ученых Йельского университета показало, что даже столь хорошо известная формула имеет строгие границы применимости, которые далеко не всегда учитываются при анализе экспериментальных данных. Физики не только подтвердили классические ограничения золотого правила Ферми, но и впервые подробно проследили, как система ведет себя до начала действия формулы, во время ее применения и после выхода за пределы области ее корректной работы.

Золотое правило Ферми связывает измеряемую скорость квантовых переходов с микроскопическими характеристиками системы. Например, оно позволяет определить, насколько быстро атом может перейти между энергетическими уровнями под действием электромагнитного излучения, как происходит испускание фотонов, рассеяние электронов или взаимодействие различных квантовых состояний. Благодаря своей универсальности эта формула стала одним из основных инструментов современной квантовой физики и входит практически во все университетские курсы по данной дисциплине.

Однако универсальность не означает безусловную применимость. Как показало новое исследование, формула корректно описывает процессы только при соблюдении определенных физических условий. Если они нарушаются, результаты расчетов могут заметно расходиться с реальным поведением квантовой системы.

К своему открытию исследователи пришли во время совершенно другого проекта, посвященного изучению квазичастиц — коллективных квантовых возбуждений, которые возникают в сложных взаимодействующих системах и позволяют моделировать поведение вещества на микроскопическом уровне.

В качестве экспериментальной платформы использовались ультрахолодные атомы, охлажденные до температур порядка нескольких нанокельвинов — миллиардных долей градуса выше абсолютного нуля. При столь экстремально низких температурах тепловое движение практически исчезает, а квантовые эффекты становятся доминирующими. Это позволяет наблюдать процессы, которые при обычных условиях оказываются скрыты хаотическим движением частиц.

Используя высокоточное радиочастотное управление, ученые изменяли спиновое состояние атомов и с беспрецедентной точностью отслеживали весь процесс развития квантового перехода. Именно такая точность впервые позволила увидеть полную временную картину работы золотого правила Ферми.

Оказалось, что знаменитая формула действует далеко не на всех этапах эволюции системы. До определенного момента она еще неприменима, затем наступает сравнительно узкий временной интервал, когда ее предсказания идеально совпадают с экспериментом, а затем система постепенно выходит за пределы области, где приближение продолжает оставаться справедливым.

Анализ экспериментов позволил выделить два ключевых условия, которые обязательно должны выполняться. Во-первых, внешнее воздействие, вызывающее квантовый переход, должно оставаться достаточно слабым. Во-вторых, наблюдение должно проводиться только в определенном временном

диапазоне.

На первый взгляд оба требования выглядят очевидными, однако на практике определить их значительно сложнее. Понятие «слабого возмущения» оказывается относительным и зависит от внутренних энергетических масштабов конкретной квантовой системы. Во многих современных исследованиях эти масштабы заранее неизвестны, поэтому оценить допустимую силу воздействия бывает весьма трудно.

Не менее сложной оказалась и проблема временного интервала. Окно применимости золотого правила открывается лишь после того, как система успевает отреагировать на внешнее воздействие, но закрывается раньше, чем начальное квантовое состояние существенно изменится. При этом продолжительность такого окна определяется внутренними свойствами самой системы и может сильно различаться в зависимости от характера взаимодействий между частицами.

Для относительно простых объектов, например отдельных атомов во внешнем электромагнитном поле, все необходимые параметры можно вычислить с высокой точностью. Однако ситуация радикально меняется для сильно взаимодействующих квантовых систем, включающих большое количество частиц. Именно такие объекты сегодня находятся в центре внимания физики конденсированного состояния, исследований новых материалов и разработки квантовых компьютеров.

В подобных случаях даже современные суперкомпьютеры зачастую не способны выполнить полный расчет динамики системы. Возникает своеобразный замкнутый круг: чтобы правильно интерпретировать эксперимент, необходимо использовать золотое правило Ферми, но для определения границ его применимости требуется информация, которую можно получить только в ходе самого эксперимента.

Авторы исследования считают, что их работа фактически представляет собой практическое руководство по использованию одной из важнейших формул квантовой механики. Полученные результаты помогают понять, когда золотое правило действительно отражает физическую реальность, а когда его применение может привести к ошибочным выводам.

Значение этой работы выходит далеко за рамки фундаментальной науки. Сегодня золотое правило Ферми активно используется в химии, материаловедении, физике полупроводников, нанотехнологиях, разработке квантовых сенсоров, фотонных устройств и квантовых компьютеров. По мере развития квантовых технологий возрастает и потребность в максимально точном

понимании ограничений классических теоретических моделей.

Исследование также демонстрирует важную особенность современной физики: даже формулы, десятилетиями считавшиеся полностью изученными, продолжают открывать новые стороны благодаря развитию экспериментальных методов. Современные технологии позволяют наблюдать квантовые процессы с такой детализацией, которая была недоступна предыдущим поколениям исследователей, что приводит не к пересмотру фундаментальных законов, а к более глубокому пониманию условий их применения.

Работа ученых Йельского университета показывает, что золотое правило Ферми остается одним из самых надежных инструментов квантовой механики, однако пользоваться им следует так же внимательно, как любым высокоточным научным прибором. Понимание того, где именно проходит граница между областью его справедливости и областью, где начинают проявляться более сложные квантовые эффекты, позволит повысить точность будущих исследований и ускорить разработку новых квантовых технологий.

Ссылка: «Возникновение золотого правила Ферми в квантовой многочастичной системе» [DOI: 10.1038/s41567-026-03316-1](https://doi.org/10.1038/s41567-026-03316-1).