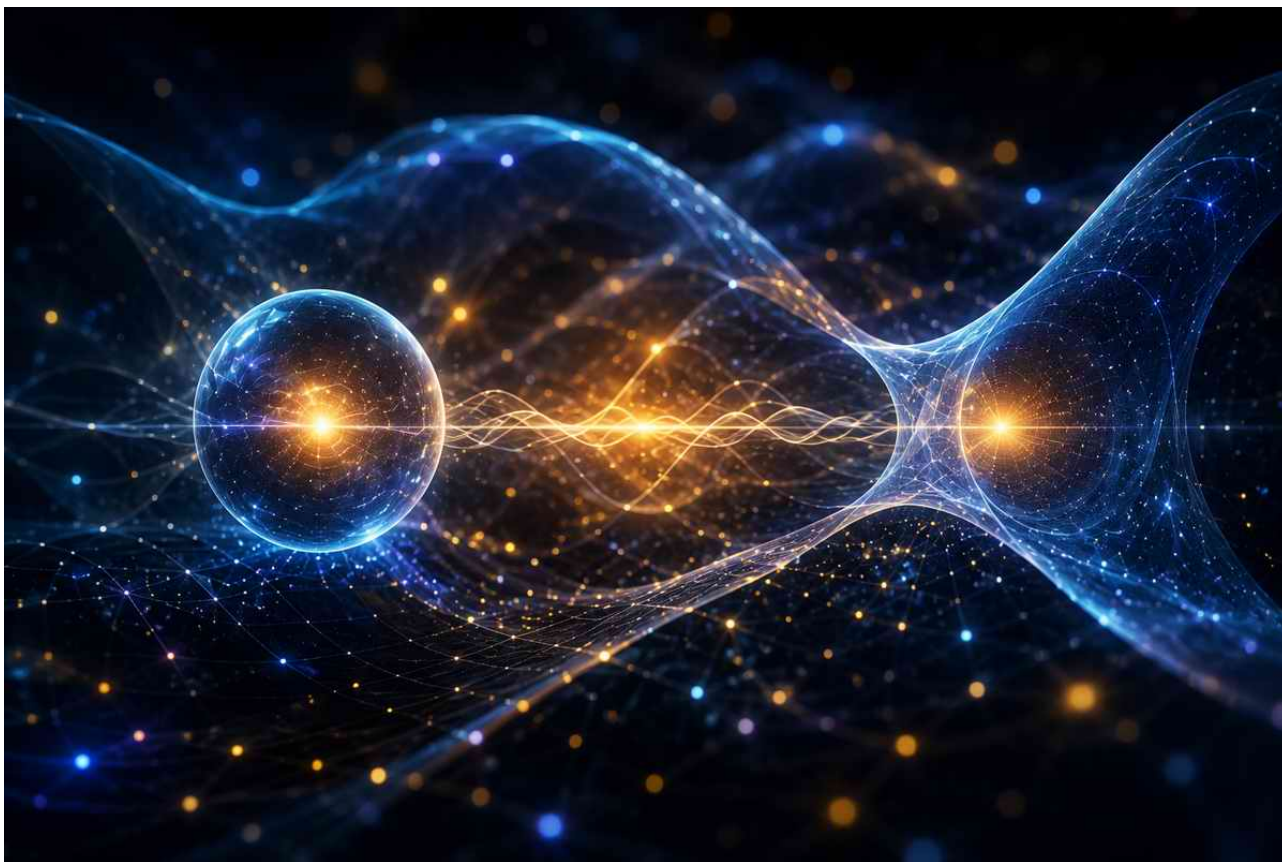


Физики обнаружили новое геометрическое свойство неэрмитовой квантовой механики



Дата публикации: 06.07.2026

Квантовая механика давно считается одной из самых успешных и одновременно самых сложных физических теорий. За последние десятилетия ученые убедились, что многие квантовые явления невозможно понять без геометрического подхода, который позволяет описывать поведение квантовых состояний не только с помощью привычных уравнений, но и через свойства абстрактных пространств. Именно геометрические концепции сегодня лежат в основе объяснения таких эффектов, как квантовая проводимость, топологические состояния вещества, сверхпроводимость и фазовые переходы. Теперь исследователи сделали еще один важный шаг вперед, обнаружив ранее неизвестное геометрическое свойство неэрмитовой квантовой механики.

Работа опубликована в журнале *Physical Review Research* и посвящена одному из самых быстро развивающихся направлений современной теоретической физики — неэрмитовым квантовым системам. В отличие от традиционной квантовой механики, где предполагается сохранение полной вероятности и энергии, неэрмитовые модели позволяют описывать реальные

физические системы, в которых происходят усиление, затухание, потери энергии или обмен частицами с окружающей средой. Именно поэтому такие модели активно используются в современной фотонике, оптике, акустике, квантовой электронике и других областях прикладной физики.

Обычная квантовая механика строится на эрмитовых операторах, гарантирующих стабильность физических величин и сохранение вероятности. Однако многие реальные устройства работают в условиях постоянных потерь или усиления сигнала. Лазеры, фотонные кристаллы, резонаторы, метаматериалы и некоторые квантовые сенсоры невозможно полностью описать классическими моделями. Здесь на помощь приходит неэрмитова квантовая механика, которая учитывает открытый характер подобных систем.

Одним из важнейших понятий современной квантовой геометрии считается фаза Берри. Она возникает при медленном изменении параметров квантовой системы и отражает скрытые геометрические свойства пространства состояний. Именно фаза Берри помогает объяснить широкий круг физических явлений — от поведения электронов в твердых телах до работы топологических изоляторов. Ранее ученые уже предложили обобщение этой идеи для неэрмитовых систем, однако многие геометрические особенности таких моделей оставались практически неизученными.

Исследовательская группа поставила перед собой задачу выяснить, существуют ли геометрические эффекты, которые вообще невозможны в обычной квантовой механике и возникают исключительно в неэрмитовых системах. Именно такие явления представляют наибольший интерес, поскольку позволяют глубже понять фундаментальные законы природы и одновременно найти новые способы управления квантовыми устройствами.

В предыдущих исследованиях авторы уже показали, что при медленном изменении параметров системы усиление сигнала может содержать особый геометрический вклад. В новой работе им удалось установить, при каких условиях этот вклад перестает зависеть от конкретного пути изменения параметров и определяется исключительно начальными и конечными состояниями системы. Подобный результат не имеет аналогов в стандартной эрмитовой квантовой механике.

Ключевым элементом исследования стал фактор Петерманна — величина, давно известная специалистам по лазерной физике и квантовой оптике. Обычно этот параметр характеризует степень неортогональности собственных состояний открытой системы и используется при анализе шумов, нестабильности и усиления излучения. До настоящего времени фактор Петерманна рассматривался преимущественно как статическая характеристика конкретной

физической системы.

Новое исследование показало, что его роль значительно глубже. Ученым удалось доказать существование прямой связи между фактором Петерманна и геометрическим усилением, возникающим при адиабатическом изменении параметров системы. Иными словами, величина, которая ранее описывала лишь геометрические свойства состояний, оказалась непосредственно связанной с динамикой развития квантовых процессов.

Особенно интересным оказался случай, когда система обладает определенными симметриями, например взаимностью распространения сигналов. В таких условиях геометрическое усиление полностью определяется отношением факторов Петерманна в начальной и конечной точках эволюции системы и перестает зависеть от промежуточной траектории изменения параметров. Это существенно упрощает описание сложных квантовых процессов и открывает новые возможности для их практического использования.

Полученные теоретические результаты были проверены с помощью численного моделирования нескольких физических моделей, близких к реально существующим экспериментальным установкам. Расчеты подтвердили аналитические выводы и показали, что предложенная теория устойчиво работает в различных конфигурациях неэрмитовых систем.

Практическое значение открытия может оказаться весьма существенным. Фактор Петерманна считается одной из фундаментальных характеристик открытых квантовых систем, однако его прямое экспериментальное измерение традиционно связано с большими трудностями. Авторы исследования показали, что теперь эту величину можно определить косвенно через наблюдаемое геометрическое усиление сигнала, что значительно упрощает экспериментальные исследования.

Подобный подход способен найти применение при создании высокочувствительных фотонных устройств, лазеров нового поколения, квантовых усилителей, оптических вычислительных систем и сенсоров, работающих в условиях чрезвычайно слабых сигналов. Управление геометрическим усилением также представляет интерес для разработки перспективных квантовых технологий обработки информации.

Особую роль работа играет и для фундаментальной науки. Она объединяет две ранее практически независимые концепции неэрмитовой физики — геометрическую фазу и фактор Петерманна — в единую математическую структуру. Такое объединение позволяет по-новому взглянуть на процессы эволюции открытых квантовых систем и существенно расширяет существующую

теоретическую базу.

Следующим этапом исследований станет изучение более сложных пространств параметров, а также процессов, происходящих вне адиабатического режима. Особый интерес представляют неэрмитовы топологические фазовые переходы, где геометрические свойства пространства могут проявляться еще более необычным образом. Эти исследования способны привести к открытию новых фундаментальных эффектов, которые впоследствии найдут применение в квантовых вычислениях, фотонных схемах и интеллектуальных сенсорных системах.

Работа демонстрирует, что геометрия продолжает играть ключевую роль в развитии современной квантовой физики. По мере того как ученые переходят от идеализированных замкнутых систем к реальным устройствам с потерями и усилением, именно неэрмитовая квантовая механика становится одним из наиболее перспективных направлений исследований. Новое открытие не только углубляет понимание фундаментальных законов микромира, но и создает теоретическую основу для будущих технологий, в которых геометрические свойства квантовых состояний будут использоваться для управления светом, информацией и энергией на принципиально новом уровне.

Ссылка: «Геометрический вклад в адиабатическое усиление в неэрмитовых системах» DOI: [10.1103/physrevresearch.7.013173](https://doi.org/10.1103/physrevresearch.7.013173).