

Скрытая геометрия запутанности: как обычные фотоны раскрыли тысячи топологий в многомерном пространстве

Дата публикации: 05.01.2026

Квантовая запутанность давно считается одним из самых фундаментальных и одновременно загадочных ресурсов современной физики. Она лежит в основе квантовой связи, квантовых вычислений и квантовой криптографии, а также регулярно создаётся в лабораториях по всему миру с помощью хорошо отработанных оптических методов. Однако новые исследования показали, что даже эта, казалось бы, хорошо изученная форма квантовой корреляции скрывает в себе гораздо более глубокую структуру, чем предполагалось ранее.

Международная группа учёных из Университет Витватерсранда и Университет Хучжоу обнаружила, что обычная пространственная квантовая запутанность фотонов может обладать тысячами различных топологических конфигураций в многомерном пространстве состояний. Речь идёт не о редких экзотических системах, а о стандартном инструменте квантовой оптики, который используется практически в каждой специализированной лаборатории.

В основе экспериментов лежит процесс спонтанного параметрического преобразования вниз, при котором один фотон распадается на пару запутанных фотонов. Этот процесс естественным образом создаёт запутанность в пространственных степенях свободы света. Долгое время считалось, что такие состояния описываются относительно простыми геометрическими структурами, однако новый анализ показал, что внутри этого «пространства» скрыт целый мир сложных многомерных топологий.

Ключевым параметром, позволившим выявить эту скрытую структуру, стал орбитальный угловой момент света. В отличие от поляризации, которая ограничена небольшим числом состояний, орбитальный угловой момент может принимать принципиально неограниченное количество значений. Это означает, что пространство состояний запутанных фотонов становится многомерным в самом строгом математическом смысле. Исследователи показали, что измерения орбитального углового момента двух запутанных фотонов позволяют напрямую выявлять топологические свойства самой запутанности.

В результате был зафиксирован рекордный для физических систем масштаб: 48 измерений и более 17 000 различных топологических сигнатур. Это самый высокий показатель топологической сложности, когда-либо экспериментально наблюдавшийся в одной системе. Такой набор можно рассматривать как

огромный алфавит, пригодный для кодирования квантовой информации с беспрецедентной плотностью и гибкостью.

Важным теоретическим результатом стало понимание того, что при переходе от двумерных к многомерным топологиям описание системы требует уже не одного топологического числа, а целого спектра взаимосвязанных характеристик. Это резко отличает многомерную квантовую топологию от классических оптических и конденсированных систем, где топологическое состояние часто описывается одним инвариантом.

Принципиально значимым оказалось и то, что для выявления этих структур достаточно одного физического свойства света. Ранее считалось, что для построения сложной топологии необходимо комбинировать как минимум две независимые степени свободы, например орбитальный угловой момент и поляризацию. Новая работа показала, что пространственная запутанность сама по себе уже содержит всю необходимую информацию, а топология буквально «встроена» в стандартные квантовые состояния.

Список ключевых фактов открытия: стандартная запутанность содержит скрытую топологию, орбитальный угловой момент задаёт многомерность, обнаружено более 17 000 сигнатур, использованы обычные лабораторные методы.

С практической точки зрения это открытие может изменить отношение к запутанности орбитального углового момента, которая ранее считалась слишком хрупкой для реальных квантовых технологий. Топологические свойства известны своей устойчивостью к локальным возмущениям и шуму, а значит, информация, закодированная в топологической структуре запутанности, может быть значительно более защищённой от ошибок.

Это открывает новые перспективы для квантовой связи и квантовых вычислений, где устойчивость к шуму остаётся одной из главных нерешённых проблем. Вместо того чтобы бороться с хрупкостью квантовых состояний, исследователи получают возможность использовать их внутреннюю геометрию как защитный механизм. Фактически запутанность перестаёт быть просто корреляцией между частицами и превращается в носитель сложной топологической информации.

Список возможных применений: топологически защищённая квантовая связь, более надёжное квантовое кодирование, новые архитектуры квантовых вычислений, диагностика сложных квантовых состояний.

Отдельного внимания заслуживает универсальность подхода. Все необходимые ресурсы уже доступны в большинстве лабораторий квантовой

оптики, и для воспроизведения результатов не требуется создание специализированных установок или участие узкопрофильных инженеров. Это означает, что обнаруженная топологическая структура не является экзотикой, а представляет собой фундаментальное свойство квантовой запутанности, которое просто долгое время оставалось незамеченным.

В более широком контексте работа демонстрирует, что даже хорошо изученные квантовые явления могут скрывать неожиданные уровни сложности. По мере того как физика всё глубже исследует многомерные пространства состояний, становится очевидно, что геометрия и топология играют всё более важную роль в понимании квантовой реальности. Обычная запутанность, казавшаяся исчерпанной темой, неожиданно оказалась окном в богатую и ранее невидимую структуру квантового мира.

Ссылка: «Раскрытие топологической природы запутанных состояний орбитального углового момента света» DOI: [10.1038/s41467-025-66066-3](https://doi.org/10.1038/s41467-025-66066-3).