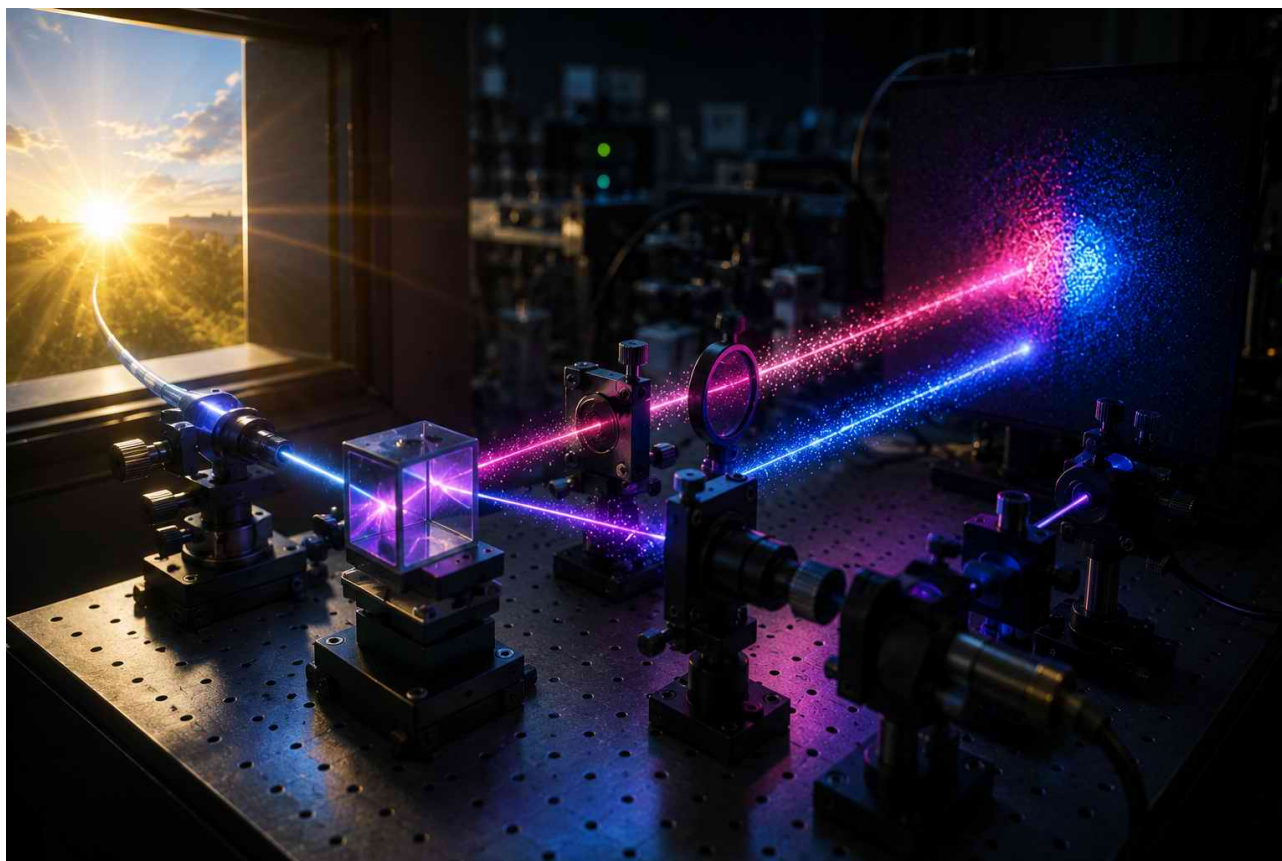


Учёные впервые получили квантовые «призрачные изображения» с помощью обычного солнечного света



Дата публикации: 20.05.2026

Квантовая оптика долгое время считалась областью, полностью зависящей от сверхточных лазеров, сложной лабораторной техники и идеально контролируемых условий. Большинство экспериментов с квантовыми фотонами требуют стабильного когерентного излучения, поскольку даже небольшие колебания света способны разрушить тонкие квантовые эффекты. Именно поэтому идея использовать обычный солнечный свет для создания квантово-коррелированных фотонов ещё недавно казалась практически невозможной. Однако новое исследование международной группы физиков показывает, что сама природа может выступать источником квантовых состояний света. Учёные впервые продемонстрировали получение «фантомных изображений» с помощью фотонов, созданных исключительно солнечным светом.

Работа стала важным событием для всей области квантовой фотоники. Исследователи доказали, что солнечное излучение способно запускать процессы, которые ранее ассоциировались исключительно с лазерной физикой.

Более того, система смогла создать квантовые корреляции достаточно высокого качества для реализации так называемой ghost imaging — фантомной или призрачной визуализации.

Этот необычный метод получения изображений считается одним из самых загадочных эффектов современной квантовой оптики. В классической фотографии камера регистрирует свет, отражённый от объекта. В фантомной визуализации изображение восстанавливается иначе: одна частица света взаимодействует с объектом, а другая — связанная с ней квантовой корреляцией — никогда не «видит» объект напрямую. Тем не менее информация о форме и структуре объекта восстанавливается благодаря статистической связи между двумя фотонами.

Основой эксперимента стал процесс спонтанного параметрического преобразования частоты вниз, известный как SPDC. В классических квантово-оптических установках лазер направляют в специальный нелинейный кристалл. Внутри него один фотон высокой энергии распадается на два связанных фотона меньшей энергии. Такие фотоны обладают сильной квантовой корреляцией и используются в исследованиях запутанности, квантовой связи и квантовой визуализации.

Долгое время считалось, что для SPDC необходим исключительно когерентный источник света, например лазер. Солнечный свет выглядит полной противоположностью: его интенсивность постоянно меняется, он содержит широкий спектр длин волн, а положение Солнца непрерывно смещается. Подобная нестабильность должна была разрушать условия, необходимые для генерации квантовых корреляций.

Однако в последние годы физики начали понимать, что SPDC может работать даже при частично когерентном освещении. Это открыло возможность использовать естественные источники света, включая солнечное излучение. Главной задачей стало создание системы, способной компенсировать нестабильность солнечного света и сохранить достаточное качество квантовых эффектов.

Для эксперимента исследователи разработали сложную установку с автоматическим солнечным трекером, напоминающим экваториальную монтировку телескопа. Система непрерывно отслеживала движение Солнца и направляла свет в длинное многомодовое оптоволокно длиной около двадцати метров. Затем солнечный свет поступал в затемнённую лабораторию и освещал нелинейный кристалл РРКТР — один из наиболее популярных материалов в современной квантовой фотонике.

Несмотря на нестабильность естественного освещения, установка успешно генерировала пары фотонов с выраженной пространственной корреляцией. Чтобы проверить качество квантовых состояний, исследователи использовали метод фантомной визуализации.

Сначала система восстановила изображение двойной щели — классического объекта в экспериментах по квантовой физике. Затем учёные смогли получить более сложное двумерное изображение, которое в публикации описывается как «призрачное лицо». Качество реконструкции оказалось неожиданно высоким.

Видимость изображения достигла примерно 90,7 процента, что лишь немного уступает лабораторным лазерным установкам, обеспечивающим около 95,5 процента при аналогичной мощности накачки. Для солнечного света такой результат считается крайне впечатляющим, поскольку ранее многие физики сомневались в самой возможности получения устойчивых квантовых корреляций при естественном освещении.

Одной из причин успеха оказался широкий спектр солнечного света. Он помогает поддерживать условия квазифазового согласования внутри нелинейного кристалла, что способствует генерации большого числа коррелированных фотонных пар. Дополнительную роль сыграла длительная обработка сигнала: накопление данных в течение продолжительного времени улучшало отношение сигнал/шум и компенсировало естественные колебания солнечного освещения.

Эксперимент фактически демонстрирует возможность создания полностью пассивных квантовых систем. В отличие от традиционных установок, здесь не использовались лазеры, мощные источники питания или сложная активная стабилизация. Единственным источником энергии выступал солнечный свет.

Подобные технологии могут оказаться особенно полезными для космических миссий, удалённых научных станций и автономных квантовых систем, где использование тяжёлого лазерного оборудования затруднено. Квантовая визуализация на основе солнечного света потенциально способна работать в условиях ограниченных ресурсов и минимального энергопотребления.

Исследователи также считают, что сочетание солнечной квантовой фотоники с современными методами обработки данных может значительно улучшить качество изображений. Уже рассматриваются алгоритмы машинного обучения, методы сжатого зондирования и новые схемы реконструкции сигналов, позволяющие получать более чёткие изображения даже при слабом естественном освещении.

Работа показывает, насколько быстро меняются представления о квантовой

физике. Ещё недавно считалось, что сложные квантовые эффекты требуют исключительно искусственных лабораторных условий. Теперь выясняется, что даже обычный солнечный свет способен создавать квантовые корреляции, достаточные для высокотехнологичной визуализации.

Фактически исследование впервые делает шаг к созданию квантовых технологий, работающих напрямую на природных источниках энергии. И если раньше квантовая оптика ассоциировалась исключительно с дорогими лабораториями, то теперь часть этих эффектов начинает переходить в более естественную и потенциально доступную среду.

Ссылка: «Спонтанное параметрическое преобразование вниз, возбуждаемое солнечным светом, для получения фантомных изображений» DOI: [10.1117/1.AP.8.3.036011](https://doi.org/10.1117/1.AP.8.3.036011).