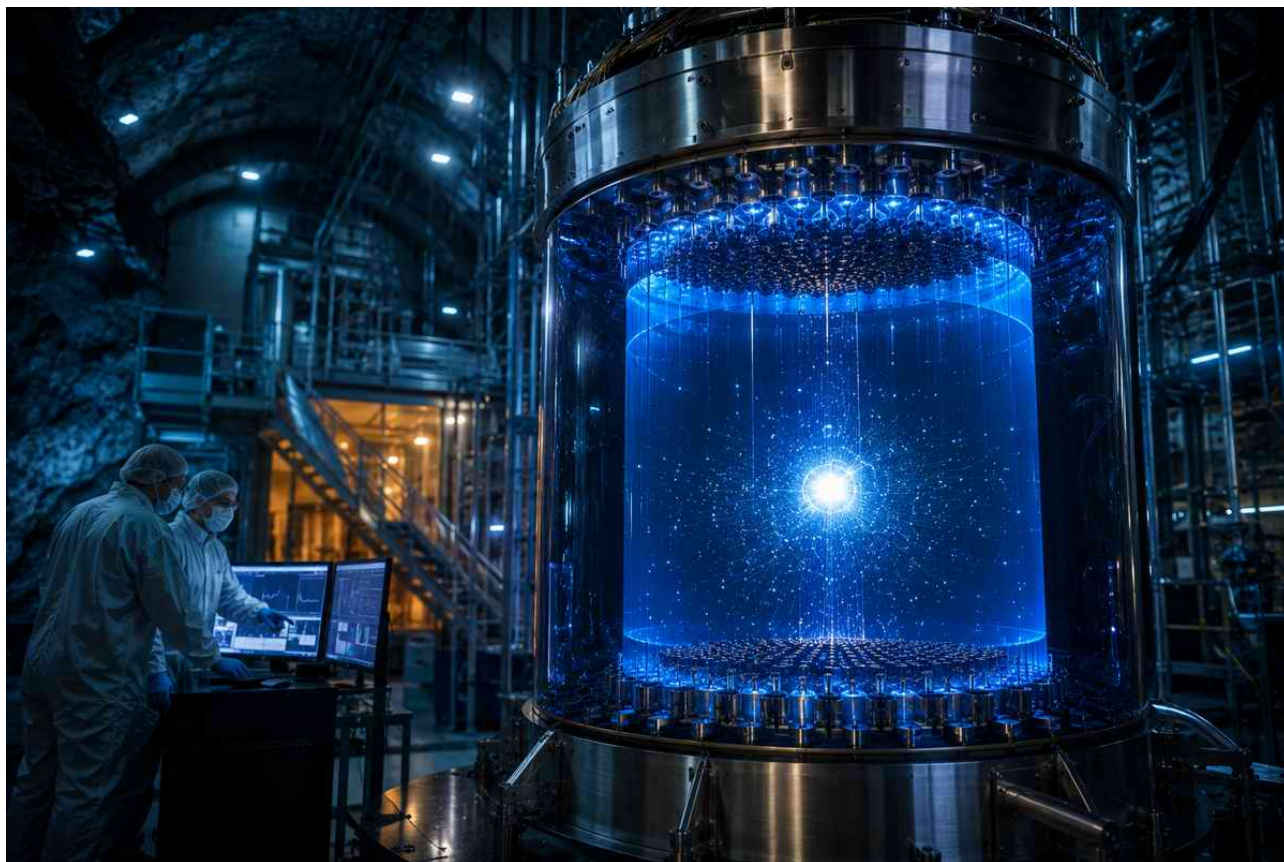


Детектор тёмной материи XENONnT поставил под сомнение теории квантового коллапса



Дата публикации: 07.05.2026

Одна из самых загадочных проблем современной физики связана с тем, почему квантовые объекты при измерении переходят из состояния суперпозиции в одно конкретное состояние. В квантовой механике частица может одновременно находиться сразу в нескольких состояниях, однако в момент наблюдения эта неопределенность исчезает. Такой процесс называют коллапсом волновой функции, а сама проблема уже десятилетиями остается предметом споров между физиками и философами науки.

В последние годы появились теории, предполагающие, что коллапс волновой функции является не следствием измерения, а реальным физическим процессом. Среди наиболее известных моделей — теория непрерывной спонтанной локализации CSL и модель Диози-Пенроуза, связывающая коллапс с гравитацией. Обе модели предсказывают, что спонтанный коллапс должен сопровождаться слабым рентгеновским излучением, которое потенциально можно обнаружить экспериментально.

Именно такую проверку провела международная команда ученых с использованием сверхчувствительного детектора тёмной материи XENONnT, расположенного в подземной лаборатории INFN Gran Sasso National Laboratory в Италии. Результаты исследования опубликованы в Physical Review Letters и уже считаются одним из самых строгих экспериментальных тестов теорий квантового коллапса.

Детектор XENONnT представляет собой гигантскую двухфазную камеру, заполненную жидким ксеноном. Его основная задача — поиск частиц тёмной материи, однако исключительно низкий уровень фонового шума и высокая чувствительность позволяют использовать установку и для изучения фундаментальных квантовых эффектов. Когда частица взаимодействует с атомами ксенона, возникают световые и электрические сигналы, по которым можно определить энергию события и место его возникновения.

Исследователи предположили, что если модели квантового коллапса верны, то внутри детектора должны периодически возникать характерные рентгеновские вспышки. Для поиска таких сигналов ученые разработали сложную систему моделирования, учитывающую радиоактивный фон, взаимодействие солнечных нейтрино, свойства атомов ксенона и энергетическое распределение возможного излучения.

Особенно важным стало новое теоретическое описание низкоэнергетических эффектов. Предыдущие модели предполагали относительно гладкое распределение рентгеновских сигналов, что затрудняло их выделение на фоне естественного шума. Однако новые расчеты показали, что квантовый коллапс должен создавать характерные «выступы» в энергетическом спектре на низких энергиях. Это значительно повысило чувствительность анализа.

В ходе работы ученые исследовали данные первой научной кампании XENONnT, проводившейся в 2021 году. Для минимизации помех использовалась только центральная часть объема жидкого ксенона, а внешние слои служили дополнительной защитой от радиационного фона. Такой подход позволил достичь рекордной чистоты сигнала.

Несмотря на высокую чувствительность эксперимента, никаких убедительных следов рентгеновских вспышек, связанных со спонтанным коллапсом, обнаружено не было. Однако отсутствие сигнала оказалось не менее важным результатом. Исследование позволило установить самые строгие ограничения на параметры моделей CSL и Диози-Пенроуза, причем для модели CSL чувствительность оказалась более чем в сто раз выше по сравнению с предыдущими экспериментами.

Полученные данные существенно сокращают пространство возможных параметров для теорий спонтанного коллапса. Это означает, что если такие процессы действительно существуют, то они происходят гораздо реже или слабее, чем предполагалось ранее. Таким образом, современные модели квантового коллапса сталкиваются с все более серьезными экспериментальными ограничениями.

Особое значение работа имеет для исследований квантовой гравитации. Некоторые теоретики предполагают, что коллапс волновой функции может быть связан с фундаментальной структурой пространства-времени и квантовой природой гравитации. В таком случае поиск слабых электромагнитных сигналов становится одним из немногих способов экспериментально проверить подобные гипотезы.

Развитие ксеноновых детекторов за последние два десятилетия существенно расширило их возможности. Если ранние установки содержали всего несколько килограммов ксенона, то современные системы оперируют уже тоннами вещества. При этом уровень фонового шума продолжает снижаться, а чувствительность растет. Благодаря этому такие установки постепенно превращаются не только в инструменты поиска тёмной материи, но и в универсальные лаборатории для изучения новой физики.

Следующим этапом станет создание детектора нового поколения XLZD, который будет содержать в несколько раз больше ксенона, чем XENONnT и LUX-ZEPLIN. Он позволит исследовать еще более слабые сигналы, включая эффекты, связанные с квантовым коллапсом, солнечными нейтрино и редкими ядерными процессами.

Работа XENONnT демонстрирует, насколько тесно сегодня связаны теоретическая и экспериментальная физика. Даже отсутствие ожидаемого сигнала помогает уточнять фундаментальные теории и приближает науку к пониманию того, как именно устроена квантовая реальность, каким образом возникает коллапс волновой функции и существует ли связь между квантовой механикой и гравитацией.

Ссылка: «Оспаривание спонтанного квантового коллапса с помощью детектора темной материи XENONnT» DOI: [10.1103/2jm3-4976](https://doi.org/10.1103/2jm3-4976).