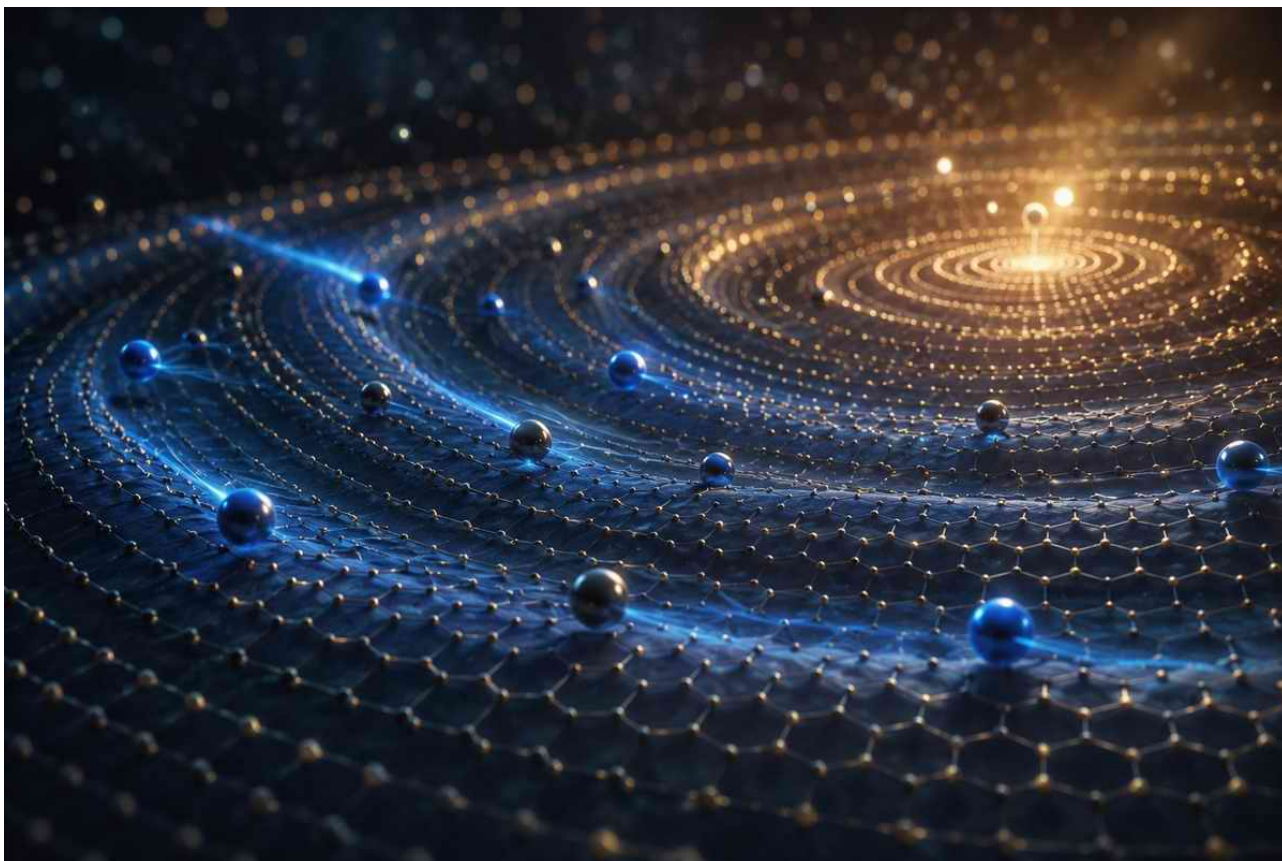


Ученые впервые получили убедительные доказательства существования высокоэнергетических гравитонов в квантовой материи



Дата публикации: 07.07.2026

Современная физика давно вышла за пределы привычного представления о частицах. В некоторых материалах электроны способны вести себя настолько необычно, что начинают образовывать коллективные состояния, в которых возникают совершенно новые объекты — квазичастицы. Они не существуют в свободном пространстве, однако внутри квантовой материи ведут себя так, словно являются самостоятельными частицами со своими свойствами, массой, зарядом и даже спином.

Именно такие экзотические состояния сегодня считаются одной из самых перспективных областей физики конденсированного состояния. Их изучение помогает глубже понять природу квантовых взаимодействий и может стать основой для создания будущих квантовых технологий.

Новое исследование, опубликованное в журнале Nature Physics, стало

важным шагом в этом направлении. Международная группа физиков под руководством ученых из Нанкинского университета впервые получила убедительные экспериментальные доказательства существования высокоэнергетических киральных гравитонов — крайне редких коллективных возбуждений, которые на протяжении многих лет существовали главным образом в виде теоретических моделей.

Несмотря на название, эти объекты не имеют прямого отношения к гипотетическим гравитонам, которые в физике элементарных частиц рассматриваются как возможные переносчики гравитации. Речь идет о совершенно другом явлении.

Киральные гравитоны представляют собой коллективные колебания квантовой геометрии внутри электронного материала. Они возникают не в космосе и не в вакууме, а в особых квантовых системах, где огромное количество электронов начинает двигаться согласованно, образуя новые коллективные состояния.

Чтобы понять значение открытия, необходимо обратиться к одному из самых необычных явлений современной физики — дробному квантовому эффекту Холла.

Он возникает только при выполнении сразу нескольких экстремальных условий. Электроны должны находиться в практически двумерном слое вещества толщиной всего в несколько атомов, температура должна быть близка к абсолютному нулю, а внешнее магнитное поле — достигать огромной напряженности.

При таких условиях привычное описание поведения электронов перестает работать. Вместо отдельных частиц возникает коллективная квантовая жидкость, свойства которой невозможно объяснить классической физикой.

В этой необычной среде появляются многочисленные квазичастицы с дробными характеристиками. Например, они могут обладать зарядом, составляющим лишь часть заряда обычного электрона.

Чтобы объяснить происхождение подобных состояний, физики разработали так называемую партонную теорию. Согласно этой модели электрон внутри коллективной квантовой среды можно рассматривать как состоящий из нескольких более простых коллективных объектов — партонов.

Важно понимать, что эти партоны не являются настоящими кварками или элементарными частицами Стандартной модели. Они существуют исключительно как эффективные квазичастицы внутри квантовой материи и

возникают только благодаря сложному взаимодействию большого числа электронов.

На протяжении многих лет партонная теория успешно объясняла многочисленные экспериментальные результаты, однако прямых доказательств существования самих партонов практически не существовало.

Именно поэтому обнаружение высокоэнергетических киральных гравитонов вызвало столь большой интерес.

Современные геометрические модели дробного квантового эффекта Холла предсказывают, что небольшие колебания так называемой квантовой метрики — своеобразной геометрии коллективного квантового состояния — должны порождать особые возбуждения со спином 2. Именно эти возбуждения получили название киральных гравитонов.

Ранее исследователям уже удавалось зарегистрировать низкоэнергетические варианты подобных возбуждений. Однако существование высокоэнергетических гравитонов оставалось лишь теоретическим предположением.

Главная проблема заключалась в том, что такие возбуждения требуют значительно большей энергии и оказываются чрезвычайно сложными для экспериментального наблюдения.

Для проведения нового исследования ученые использовали двумерный электронный газ, сформированный в одиночных квантовых ямах. Эксперименты проводились при температуре около 50 миллиКельвинов — всего на несколько сотых градуса выше абсолютного нуля — и в магнитном поле напряженностью до 14 тесла, что в сотни тысяч раз превышает магнитное поле Земли.

В таких экстремальных условиях физики применили метод резонансного неупругого рассеяния света с круговой поляризацией.

Этот высокоточный спектроскопический метод позволяет буквально «прослушивать» внутренние коллективные колебания квантового материала. Когда лазерное излучение взаимодействует с системой электронов, часть света изменяет свою энергию, сохраняя информацию о происходящих внутри материала возбуждениях.

Именно таким способом исследователям удалось зарегистрировать сразу два различных типа киральных гравитонов.

Помимо уже известного низкоэнергетического возбуждения ученые впервые обнаружили высокоэнергетический гравитон, существование которого давно предсказывали геометрические модели дробного квантового эффекта Холла.

Это оказалось значительно более важным результатом, чем простое обнаружение новой квазичастицы.

Ранее исследовательская группа показала, что энергия гравитонных возбуждений напрямую связана с величиной дробного электрического заряда, существующего в системе.

Поэтому обнаружение сразу двух различных гравитонных мод в одном и том же квантовом состоянии означает, что внутри материала одновременно существуют два различных типа дробных зарядов.

Подобную картину естественным образом объясняет именно партонная теория.

Фактически эксперимент стал первым серьезным спектроскопическим подтверждением того, что партоны являются не просто удобной математической моделью, а отражают реальные коллективные объекты, возникающие в сильно коррелированной квантовой материи.

Еще несколько лет назад подобные выводы считались весьма смелыми. Теперь же физики получили экспериментальные данные, напрямую согласующиеся с теоретическими прогнозами.

Не менее важным оказалось подтверждение современной геометрической теории дробного квантового эффекта Холла.

Согласно этой концепции коллективное состояние электронов обладает собственной внутренней геометрией. Ее небольшие колебания способны распространяться подобно волнам, образуя квазичастицы со спином 2.

Именно эти возбуждения исследователи и наблюдали в эксперименте.

По сути, речь идет о колебаниях самой «геометрии» коллективного квантового состояния, а не отдельных электронов.

Подобная интерпретация значительно расширяет современные представления о квантовой материи.

Полученные результаты открывают новые возможности для изучения экзотических квантовых фаз, многие из которых пока существуют лишь в теоретических моделях.

В частности, предложенная методика может использоваться для исследования дробных изоляторов Черна, экситонных топологических состояний, новых типов топологического порядка и других сложных

коллективных систем.

Особый интерес вызывает возможность исследования неабелевых квантовых состояний.

Такие состояния считаются одной из наиболее перспективных платформ для создания отказоустойчивых топологических квантовых компьютеров. В частности, внимание исследователей привлекает состояние Мура—Рида, в котором могут существовать необычные неабелевы квазичастицы, пригодные для защищенного хранения квантовой информации.

Авторы исследования считают, что измерение различных гравитонных мод может стать новым способом поиска подобных состояний.

Не менее интригующими выглядят планы по изучению коллективных возбуждений с более высоким спином.

В ходе нынешней работы удалось зарегистрировать только моды со спином 2. Однако теоретические модели допускают существование значительно более сложных возбуждений.

По мнению исследователей, обнаружить их можно с помощью фотонов, обладающих орбитальным угловым моментом. Подобные эксперименты могут установить неожиданную связь между физикой квантовой материи и некоторыми идеями нерелятивистской теории струн.

Хотя практическое применение подобных открытий пока остается делом будущего, фундаментальное значение исследования трудно переоценить.

Оно подтверждает, что коллективные свойства квантовой материи способны породить объекты, существование которых невозможно предсказать, рассматривая электроны по отдельности.

Чем глубже физики изучают подобные системы, тем очевиднее становится, что коллективное поведение миллиардов взаимодействующих частиц приводит к появлению совершенно новых законов природы, действующих только внутри квантовых материалов.

Именно поэтому исследования дробного квантового эффекта Холла продолжают оставаться одним из наиболее активно развивающихся направлений современной физики.

Обнаружение высокоэнергетических киральных гравитонов не только подтверждает одну из важнейших теоретических моделей последних десятилетий, но и открывает новый инструмент для изучения скрытой

структуры квантовой материи. В перспективе такие исследования могут приблизить создание материалов с заранее заданными квантовыми свойствами и ускорить развитие топологических квантовых вычислений, которые считаются одним из наиболее перспективных направлений технологий XXI века.

Ссылка: «Возникновение партонов в дробных квантовых системах Холла» DOI: [10.1038/s41567-026-03338-9](https://doi.org/10.1038/s41567-026-03338-9).