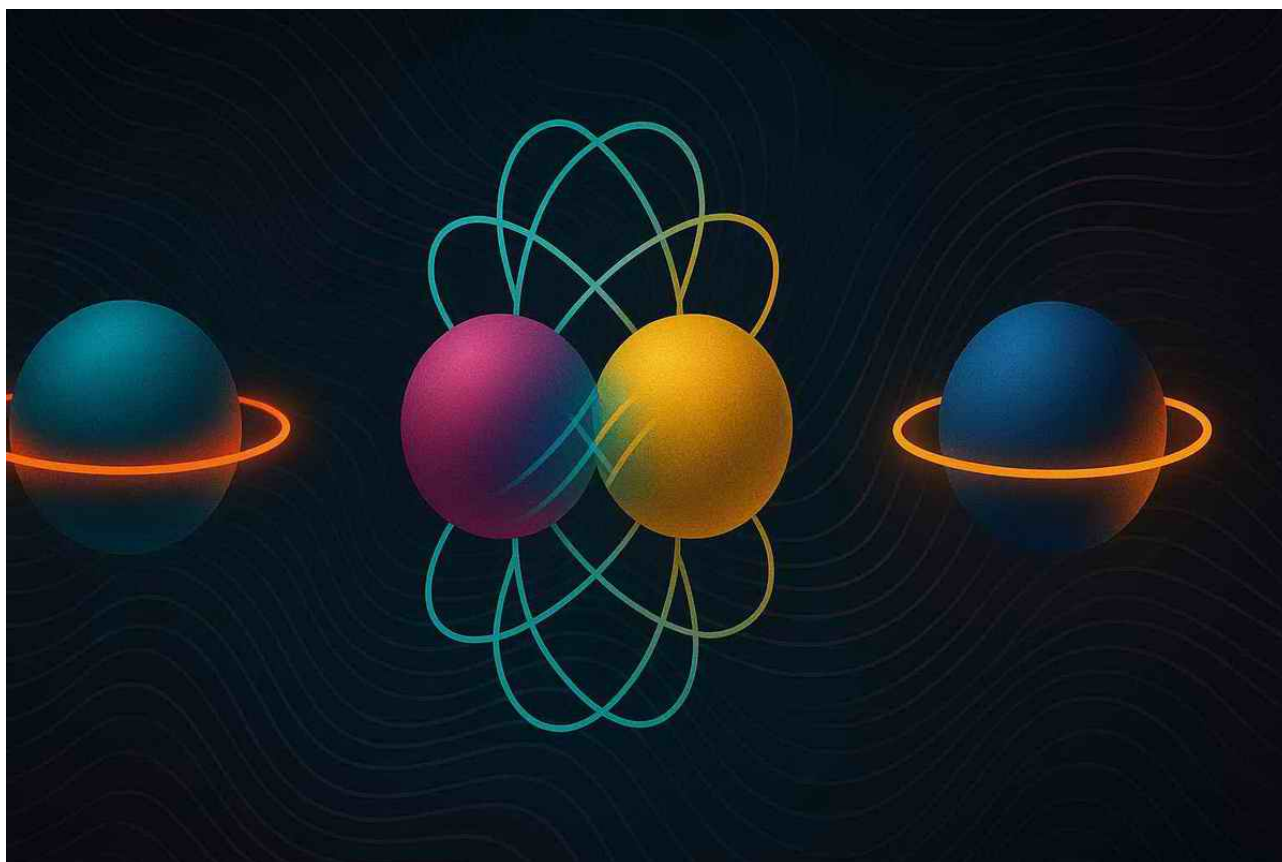


## Парачастицы: возможно ли третье царство квантовой материи?



Дата публикации: 14.07.2025

Фундаментальная картина квантовой физики может оказаться глубже и богаче, чем предполагалось. Новое исследование предсказывает существование частиц, не вписывающихся в привычное деление на фермионы и бозоны — категории, лежащие в основе всей физики элементарных частиц. Эти загадочные объекты, получившие название парачастицы, потенциально представляют собой третье царство квантовой материи с уникальными свойствами и поведением.

Фермионы, такие как электроны и протоны, подчиняются принципу Паули: они не могут находиться в одном квантовом состоянии одновременно. Это ограничение, рождаемое минусовым знаком при перестановке двух одинаковых фермионов, лежит в основе структуры атомов, молекул и твёрдой материи. Бозоны, напротив, стремятся к единству: любые два бозона могут спокойно сосуществовать в одном состоянии, как это происходит с фотонами в лазере или атомами в бозе-эйнштейновском конденсате. Основная разница между ними определяется тем, как их квантовое состояние ведёт себя при перестановке: у

фермионов появляется знак минус, у бозонов — всё остаётся без изменений.

Но математическая структура квантовой теории позволяет гораздо более сложные преобразования. В теории возможно, что при перестановке частиц их квантовое состояние не просто меняет знак, а претерпевает более общее преобразование — незаметное при непосредственном измерении, но влияющее на поведение системы. Именно такие свойства и описывают парачастицы. Впервые обоснованные Чжиюанем Ваном и Кейденом Хаззардом, их модели демонстрируют, как скрытые, не наблюдаемые напрямую состояния могут изменяться при обмене двумя идентичными частицами, создавая уникальную физику, промежуточную между фермионной и бозонной.

Прежние попытки описать парачастицы встречали трудности. В середине XX века Герберт Грин и его последователи строили модели, которые позже оказались переопределёнными вариациями тех же фермионов и бозонов. А в 1970-х теорема DHR доказала, что в трёхмерном пространстве и при выполнении принципа локальности возможны только две категории частиц — фермионы и бозоны. Однако Ван и Хаззард заметили: ограничения DHR применимы не во всех физических контекстах. Их модель допускает существование парачастиц в трёх измерениях, если отказаться от жёсткого требования неразличимости в условиях квантовой суперпозиции.

В новой модели при перестановке двух парачастиц их скрытые квантовые параметры синхронно трансформируются, как будто частицы «чувствуют» друг друга и обмениваются некой метаинформацией. Эта особенность не влияет на измерение одной частицы в отдельности, но становится заметной, если два наблюдателя сравнивают свои измерения и обнаруживают корреляции, обусловленные взаимным перепутыванием состояний.

Такая экзотика даёт неожиданный результат: в отличие от бозонов и фермионов, которые позволяют либо неограниченное количество частиц в одном состоянии, либо строго одно, парачастицы могут ограничивать допустимое число частиц в состоянии до некоторого промежуточного значения. Это открывает возможность существования совершенно новых квантовых фаз вещества с гибким квантовым наполнением.

Современные квантовые технологии уже создают платформы, где можно попытаться реализовать такие частицы. Например, ридберговские атомы — возбуждённые атомы с удалёнными электронами — обладают высоким уровнем управления и взаимодействия. Их использование в квантовых симуляторах позволяет проектировать искусственные материалы с заданными квантовыми свойствами. Некоторые физики предполагают, что именно такие платформы смогут воспроизвести поведение парачастиц и позволят экспериментально

исследовать их свойства.

В параллельной работе группа физика Маркуса Мюллера предложила строгие ограничения на существование парачастиц, анализируя, как идентичность частиц проявляется в квантовой суперпозиции. Их вывод: настоящие элементарные частицы, полностью неразличимые при любом измерении, не могут быть парачастицами. Но модель Вана и Хаззарда преднамеренно нарушает это требование: их парачастицы различимы при сравнении коррелированных измерений — и это, по их мнению, делает их физически обоснованными.

Если парачастицы существуют в природе, они могут радикально расширить наше представление о том, как устроена материя, и какие состояния вещества возможны. С их помощью можно будет моделировать ранее недостижимые экзотические фазы, возможно, реализовать новые квантовые компьютеры и исследовать скрытые уровни симметрии природы. Исследование этих объектов обещает открыть одну из последних неизведанных страниц квантовой теории поля и стать шагом к ещё более общей классификации всей возможной материи во Вселенной.