

Анионы и новая сверхпроводимость: как «дробные» электроны меняют квантовую физику



Дата публикации: 29.12.2025

В квантовой физике долгое время существовало почти аксиоматическое правило: магнетизм и сверхпроводимость несовместимы. Магнитные поля нарушают хрупкие квантовые связи между электронами, образующими куперовские пары, а значит должны разрушать сверхпроводящее состояние. Однако недавние эксперименты с разными материалами показали, что реальность сложнее. В некоторых двумерных системах эти два квантовых состояния не только сосуществуют, но и, по-видимому, усиливают друг друга, заставляя физиков пересматривать устоявшиеся представления.

Теоретическое объяснение этой парадоксальной картины предложила группа исследователей из Массачусетский технологический институт. Их работа указывает на то, что ключевую роль могут играть анионы — экзотические квазичастицы, возникающие при фракционировании электронов в двумерных материалах. В отличие от привычных частиц, анионы не принадлежат ни к фермионам, ни к бозонам и подчиняются собственным квантовым правилам, возможным только в двух измерениях.

Чтобы понять значимость этой идеи, важно вспомнить, что магнетизм и сверхпроводимость — это коллективные эффекты, возникающие из квантового поведения электронов. Магнетизм появляется, когда спины или орбитальные движения электронов упорядочиваются, создавая макроскопическое магнитное поле. Сверхпроводимость возникает, когда электроны объединяются в связанные пары и начинают двигаться через материал без сопротивления. Долгое время считалось, что упорядоченные магнитные моменты неизбежно разрушают такие пары.

Тем не менее, эксперименты с ромбоэдрическим графеном и с двумерным дителлуридом молибдена MoTe_2 показали, что в реальных материалах возможны более сложные сценарии. Особенно интересным оказался MoTe_2 , где сверхпроводимость появляется в тех же условиях, что и экзотический фрактальный квантовый аномальный эффект Холла. В этом режиме электроны ведут себя так, словно распадаются на дробные части, каждая из которых несет лишь часть электронного заряда. Именно эти фракции и интерпретируются как анионы.

Анионы принципиально отличаются от частиц, формирующих привычную картину материи. Бозоны легко собираются в коллективные состояния, фермионы, наоборот, избегают друг друга. Анионы занимают промежуточное положение, а их квантовая статистика допускает гораздо более широкий набор сценариев поведения. Не случайно само название «анионы» было введено как ироничный намек на то, что в их мире «возможно всё».

Еще в 1980-х годах теоретики предполагали, что в присутствии магнетизма анионы могут образовывать сверхпроводящее состояние. Однако эта идея долгое время оставалась умозрительной, поскольку магнетизм и сверхпроводимость редко наблюдались одновременно. Новые эксперименты фактически вернули эту гипотезу к жизни и сделали ее предметом серьезного теоретического анализа.

В своей работе исследователи рассмотрели, при каких условиях анионы могут не просто существовать, но и коллективно двигаться без трения. С точки зрения квантовой теории поля задача оказалась нетривиальной: анионы склонны к так называемой квантовой фрустрации, при которой движение одной квазичастицы сдерживается присутствием всех остальных, даже находящихся на большом расстоянии. Это глобальное ограничение носит чисто квантово-механический характер и делает коллективное движение крайне затруднительным.

Моделируя свойства MoTe_2 , ученые показали, что в зависимости от электронной плотности в материале могут возникать анионы с зарядом в одну треть или две трети заряда электрона. Эти два типа ведут себя принципиально

по-разному. Анионы с зарядом в одну треть остаются фрустрированными и формируют состояние, близкое к обычной металлической проводимости. А вот при доминировании анионов с зарядом в две трети возникает качественно иной режим, в котором квазичастицы начинают двигаться согласованно, образуя сверхпроводящее состояние.

Этот механизм отличается от классического образования куперовских пар, но по своим последствиям оказывается удивительно похожим. Анионы выходят из состояния фрустрации и формируют макроскопический сверхток без сопротивления, несмотря на наличие магнетизма. Более того, при возникновении такой анионной сверхпроводимости система демонстрирует необычную картину вихревых токов, которые самопроизвольно появляются в случайных местах материала. Это экзотическое поведение может стать важным экспериментальным признаком, по которому теорию удастся проверить.

Если предложенная модель подтвердится, физика получит новый класс квантовых состояний, условно называемый анионной квантовой материей. Такая материя объединяет магнетизм, сверхпроводимость и дробные квазичастицы в единую картину, расширяя границы того, что считается возможным в конденсированных средах. Потенциальные последствия выходят далеко за рамки фундаментальной науки и затрагивают квантовые технологии.

Анионная сверхпроводимость может стать основой для более устойчивых кубитов, поскольку экзотические квазичастицы потенциально лучше защищены от внешних возмущений. Это открывает путь к новым архитектурам квантовых компьютеров, а также к созданию чувствительных квантовых сенсоров. В долгосрочной перспективе такие исследования могут привести к появлению материалов, свойства которых проектируются на уровне квазичастиц, а не отдельных атомов.

Таким образом, идея сверхпроводящих анионов соединяет несколько направлений современной физики — топологические эффекты, магнетизм, сверхпроводимость и квантовую теорию поля — в единую концепцию. Даже если дальнейшие эксперименты скорректируют детали, уже сейчас ясно, что анионы перестают быть экзотической теоретической абстракцией и становятся реальным инструментом для исследования и создания новых форм квантовой материи.

Ссылка: «Делокализация анионов происходит при выходе из неупорядоченного дробного квантового аномального холловского изолятора»
[DOI: 10.48550/arxiv.2506.02128.](https://doi.org/10.48550/arxiv.2506.02128)