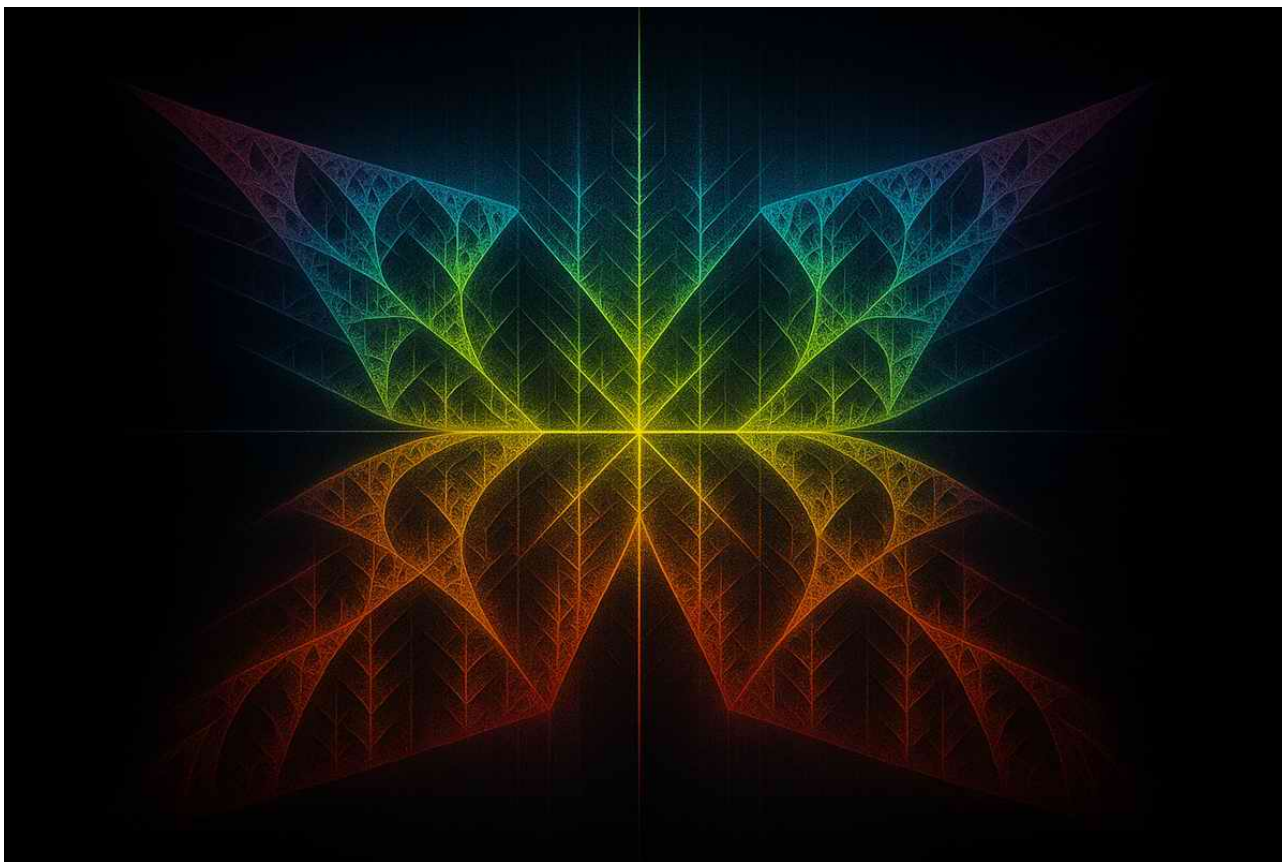


Бабочка Хофштадтера в скрученном графене: открыты новые топологические фазы материи



Дата публикации: 09.09.2025

Скрученный под магическим углом двухслойный графен (MATBG) за последние годы превратился в уникальную лабораторию для изучения экзотических квантовых фаз материи. При угле около $1,1^\circ$ два слоя графена образуют муаровую решётку, в которой электроны замедляют своё движение и начинают взаимодействовать необычным образом. Именно это делает материал идеальной платформой для исследования коррелированных электронных состояний, включая сверхпроводимость, ферромагнетизм и топологические эффекты.

Недавнее исследование, опубликованное в *Nature Physics*, стало новым шагом в изучении MATBG. Физики обнаружили в нём фрактальные энергетические структуры, предсказанные ещё в 1970-х годах Дугласом Хофштадтером и известные как «бабочка Хофштадтера». Эти структуры возникают, когда на материал воздействует сильное магнитное поле: электронные зоны преобразуются в рекурсивные паттерны, демонстрирующие необычное сочетание периодичности и фрактальности.

Эксперименты проводились на сверхчистых образцах MATBG при температурах в милликельвинах и магнитных полях в несколько тесла. Сравнивая результаты с новейшими расчётами по модели Хартри-Фока, учёные показали, что взаимодействие электронов играет ключевую роль в формировании энергетических подзон и фазовых переходов.

Главным открытием стало наблюдение каскадов топологических состояний, известных как изоляторы Черна с нарушенной симметрией (SBCI). Эти фазы проявились не случайно, а последовательно, образуя закономерный ряд чисел Черна, что ранее не удавалось зафиксировать. Вторым важным результатом стала регистрация дробных квантовых состояний Холла (FQH), возникающих при приложении магнитного поля. Их поведение оказалось нетрадиционным: вместо усиления с ростом поля, как в классических двумерных системах, они исчезали при превышении порога около 10 тесла. Это указывает на уникальную связь с геометрией муаровой решётки, когда магнитная длина сравнима с её периодом.

Теоретический анализ, выполненный в сотрудничестве с физиками-теоретиками, позволил интерпретировать такие состояния как дробные изоляторы Черна, индуцированные магнитным полем. Особенности квантовой геометрии MATBG — конечная ширина подзон, неоднородность и сложные топологические свойства — делают эти состояния принципиально отличными от тех, что наблюдаются в обычном двумерном электронном газе.

Эти результаты подчёркивают исключительный потенциал MATBG для изучения фундаментальных вопросов квантовой физики. Наблюдение фрактальных спектров и экзотических топологических фаз открывает новые направления в исследовании взаимодействий, топологии и коррелированных электронных систем. В будущем работа с подобными структурами может привести не только к глубокому пониманию квантовых фазовых переходов, но и к созданию новых платформ для квантовых технологий.

Особенно перспективным направлением становится поиск взаимосвязи между дробными изоляторами Черна и дробными квантовыми состояниями Холла. Учёные также планируют исследовать возможности оптического зондирования и управления этими состояниями с помощью света, что может привести к разработке новых квантово-оптических устройств на основе муаровых гетероструктур.

Таким образом, скрученный графен снова доказал свой статус одного из самых интригующих материалов современной физики. Он стал окном в мир квантовой топологии, где фракталы, магнитные поля и взаимодействия электронов образуют новые фазы материи, о которых ещё недавно можно было лишь догадываться.

Ссылка: «Сильно взаимодействующие состояния Хофштадтера в двухслойном графене, скрученном под магическим углом» DOI: [10.1038/s41567-025-02997-4](https://doi.org/10.1038/s41567-025-02997-4)