

УДК 535.2

ЛАФЛИНОВСКИЕ НЕРАВНОВЕСНЫЕ АНСАМБЛИ ЭНИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

© 2022 г. Л. В. Кулик^{1, 2, *}, Л. И. Мусина¹, Е. И. Белозеров^{1, 2},
А. А. Загитова¹, В. А. Кузнецов²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

*E-mail: kulik@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

Двумерные электронные системы в квантующем магнитном поле представляют исключительный интерес с точки зрения вовлечения квазичастиц с не бозевской и не фермиевской статистикой (энионной), в область прикладных физических задач. Дробные состояния квантового эффекта Холла являются единственными на сегодняшний день экспериментально реализованными кандидатами на роль системы квазичастиц с энионной статистикой. Для выяснения статистических и термодинамических свойств энионных систем, а также пригодности энионов для решения технологических задач созданы макроскопические неравновесные ансамбли нейтральных возбуждений в ДКЭХ $1/3$. Оказалось, что эти ансамбли имеют столь длинные времена релаксации, что их можно рассматривать, как новые квазиравновесные состояния энионной материи.

DOI: 10.31857/S0367676522040135

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальные работы [1, 2] по экспериментальному обнаружению квазичастиц, подчиняющихся энионной статистике в состоянии дробного квантового эффекта Холла (ДКЭХ) $1/3$, открыли принципиально новые перспективы для технологических применений энионов. Следует заметить, что экспериментальные проявления энионной статистики продемонстрированы в транспортных экспериментах в условиях дробного Холловского изолятора $1/3$, когда объемные квазичастицы, для которых предсказаны нетривиальные статистические свойства, не вносят вклад в проводимость. Именно поэтому, необходимо отдельно рассматривать связь между транспортными характеристиками дробных краевых состояний и объемных заряженных квазичастиц, что, само по себе, не является тривиальной задачей [3, 4]. Представления о нейтральных возбуждениях в энионной материи, не активных в транспортных экспериментах, еще более ограничены. Теоретические предсказания о дисперсии магнито-ротоннов в рамках одномодового приближения [5, 6] нашли качественное и количественное подтверждение в экспериментах по микроволновому поглощению для ряда состояний ДКЭХ с нарушенной трансляци-

онной симметрией [7], однако сделать какие-либо выводы о статистических свойствах магнито-ротоннов из этих экспериментов не представляется возможным ввиду того, что подобные возбуждения имеют короткие времена жизни [7], что, естественно, не оставляет возможностей для экспериментальных манипуляций с макроскопическими ансамблями этих возбуждений.

Рецепт приготовления неравновесных ансамблей магнито-ротоннов в двумерных системах при стационарном возбуждении электронной системы фотонами определенного энергетического диапазона был разработан для целочисленных Холловских изоляторов [8]. Оказывается, что можно сформировать неравновесный макроскопический ансамбль нейтральных возбуждений только в тех состояниях КЭХ, для которых выполняются определенные требования к физическим характеристикам электронной системы. Необходимо, чтобы нижайшими по энергии были нейтральные возбуждения с изменением полного спина электронной системы, в дисперсионной зависимости которых присутствует ротонный минимум. В этом случае неравновесные ансамбли возбуждений формируются вследствие существенного замедления релаксационных процессов с поворо-

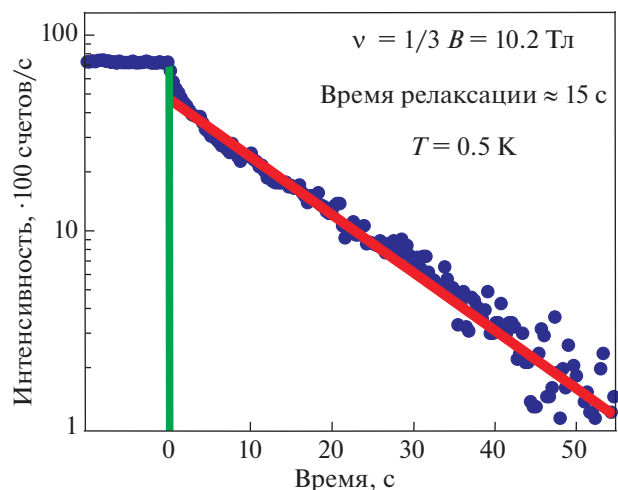


Рис. 1. Зависимость амплитуды сигнала фотоиндуцированного резонансного отражения (PRR) от времени после выключения формирующего возбуждения в электронной системе источника излучения.

том спина возбужденного электрона и отдачей большого импульса [8].

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для формирования неравновесного ансамбля нейтральных возбуждений со спином 1 в ДКЭХ 1/3 была выбрана квантовая яма шириной 18 нм с электронной концентрацией $8.4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (магнитное поле Лафлиновского состояния 1/3 составляет приблизительно 10.2 Тл). Подвижность электронной системы была на уровне $3.5 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, что оказалось вполне достаточным для наблюдения квантования холловской проводимости на факторе заполнения 1/3 при температуре 0.5 К [9]. Исследуемый образец помещался в криостат с откачкой паров He^3 , обеспечивающий минимальную температуру образца 0.45 К и магнитное поле до 14 Тл. Возбуждение электронной системы осуществлялось двумя перестраиваемыми непрерывными лазерными источниками, причем излучение первого источника могло быть модулировано внешним механическим затвором. В качестве основных экспериментальных методик использовались фотолюминесценция, фотовозбуждение и фотоиндуцированное резонансное отражение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

С помощью методики фотолюминесценции был сформирован ансамбль нейтральных возбуждений в ДКЭХ 1/3. При возбуждении электронной системы фотон с определенной энергией поглощается в квантовой яме, в результате чего электрон из валентной зоны переходит на верхний спиновый подуровень нулевого уровня Ландау зо-

ны проводимости. Фотовозбужденная дырка из-за сильного спин-орбитального взаимодействия в валентной зоне GaAs быстро релаксирует на нижайший спиновый подуровень подзоны тяжелых дырок за время около 100 пс. Поскольку в электронной системе при низкой температуре равновесно заполнен только нижайший спиновый подуровень, рекомбинация фотовозбужденной дырки с равновесным электроном приводит к тому, что в электронной системе формируется нейтральное возбуждение со спином 1, состоящее из фотовозбужденного электрона на верхнем спиновом подуровне Ландау и дырки на нижнем. Во всех оптических процессах продольный импульс фотона выбирался равным нулю, поэтому в электронной системе возможны два типа нейтральных возбуждений с единичным спином — спиновой экситон и спиновой “магнито-гравитон” [10]. При этом, наиболее вероятными кандидатами на формирование неравновесного ансамбля нейтральных возбуждений выступают спиновые “магнито-гравитоны” с нулевым импульсом.

Статистические свойства и времена релаксации возбуждений были исследованы методикой фотоиндуцированного резонансного отражения (фотоиндуцированного упругого рассеяния света). Сигнал стандартного фотоиндуцированного резонансного отражения в присутствии неравновесного макроскопического ансамбля нейтральных возбуждений имеет отрицательный знак, что демонстрирует заполнение фазового пространства на верхнем спиновом подуровне Ландау, когда там появляются электроны, входящие в возбуждения. Заполнение фазового пространства, в свою очередь, приводит к уменьшению вероятности перевести электрон из валентной зоны на верхний спиновый подуровень нулевого уровня Ландау зоны проводимости. Соответственно, глубина провала сигнала рассеяния в зависимости от энергии возбуждающего фотона характеризует эффективность накачки возбуждений фотонами от первого источника излучения. Заметим, что амплитуда рассеяния в стандартном канале ничего не говорит о статистике возбуждений.

Помимо стандартного канала упругого рассеяния света в спектре резонансного отражения появляется дополнительный канал рассеяния, сигнал в котором не падает, а возрастает с увеличением количества нейтральных возбуждений в электронной системе. Его энергия превышает минимальную энергию рождения электрон-дырочной пары, состоящей из электрона на верхнем спиновом подуровне Ландау и валентной дырки (основного канала упругого рассеяния света) на величину близкую к расчетной энергии спинового “магнито-гравитона” с нулевым импульсом. Амплитуда рассеяния в этом канале возрастает почти на порядок величины с увеличением числа возбуждений в электронной системе. Таким об-

разом, вероятность рассеяться фотону назад оказывается тем больше, чем больше неравновесных возбуждений уже имеется в электронной системе, что является отличительным свойством бозевской статистики возбуждений [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Время затухания сигнала резонансного отражения (время ухода возбуждений из начального состояния) превышает 10 с, что является абсолютным рекордом для известных на сегодняшний день времен релаксации неравновесных возбуждений в условиях КЭХ и ДКЭХ [8]. Столь длинные времена релаксации ансамбля возбуждений позволяют говорить о формировании сверх-долгоживущего (квазиравновесного) состояния электронной материи — конденсата спиновых нейтральных энионных комплексов. Представленная в статье экспериментальная реализация этого конденсата открывает интересные возможности непосредственной манипуляции квазичастицами этого экзотического состояния материи в режиме реального времени и проверки теоретических предсказаний, сделанных в работах [12].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-02-00230). В.А. Кузнецов благодарит за возможность проводить исследовательские рабо-

ты в центре коллективного пользования ВШЭ (Российский фонд фундаментальных исследований; проект № 19-32-90192).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bartolomei H., Kumar M., Bisognin R. et al.* // Science 2020. V. 368. P. 173.
2. *Nakamura J., Liang S., Gardner G.C., Manfra M.J.* // Nature Phys. 2020. V. 16. P. 931.
3. *Wen X.G.* // Mod. Phys. Lett. B. 1991. V. 5. P. 31.
4. *Lerda A.* Anyons: quantum mechanics of particles with fractional statistics. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
5. *Girvin S.M., MacDonald A.H., Platzman P.M.* // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. P. 581.
6. *Girvin S.M., MacDonald A.H., Platzman P.M.* // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. P. 2481.
7. *Kukushkin I.V., Smet J.H., Scarola V.W. et al.* // Science. 2009. V. 324. P. 1044.
8. *Kulik L.V., Zhuravlev A.S., Dickmann S. et al.* // Nature Commun. 2016. V. 7. Art. No. 13499.
9. *Кулик Л.В., Журавлев А.С., Белозеров Е.И. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2020. V. 112. P. 516.
10. *Haldane F.D.M.* // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. Art. No. 116801 (20).
11. *Inouye S., Chikkatur A.P., Stamper-Kurn D.M. et al.* // Science. 1999. V. 285. P. 571.
12. *Apalkov V.M., Pikus F.G., Rashba E.I.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. P. 6111.

Nonequilibrium Laughlin ensemble of anyon complexes

L. V. Kulik^{a, b, *}, L. I. Musina^a, E. I. Belozеров^{a, b}, A. A. Zagitova^a, V. A. Kuznetsov^b

^a Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

^b National Research Institute "Higher School of Economics", Moscow, 141700 Russia

*e-mail: kulik@issp.ac.ru

Two-dimensional electronic systems in quantizing magnetic field are of exceptional interest from the point of view of quasiparticles with non-Bose and non-Fermi statistics (anyon) being associated with applied physical problems. Fractional states of the FQHE are currently the only experimentally realized candidates for the system of quasiparticles with anyon statistics. To clarify the statistical and thermodynamic properties of anyon systems, as well as the suitability of anyons as a solution of technological problems, macroscopic nonequilibrium ensembles of neutral excitations were created in the FQHE 1/3. It turned out that these ensembles have such long relaxation times that they can be considered as new quasi-equilibrium states of anyon matter.