

УДК 538.915

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОЗБУЖДЕННОЙ ЛАФЛИНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ

© 2024 г. Л. В. Кулик^{1, *}

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

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

Поступила в редакцию 25.09.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Исследованы нейтральные возбуждения с нулевым импульсом в лафлиновской жидкости на факторе заполнения электронов $1/3$. Обнаружено, что нижайшими по энергии являются спин-магнитограви-тоны, возбуждения с одновременным изменением электронной плотности в лафлиновской жидкости и спинового квантового числа электронной системы на единицу. Демонстрируется эксперименталь-ная возможность формирования новых квазиравновесных состояний энионной материи — лафли-новских растворов спин-магнитограви-тонов. В лафлиновских растворах наблюдается новый тип оп-тического рассеяния.

DOI: 10.31857/S0367676524020056, EDN: RTLULA

ВВЕДЕНИЕ

В трехмерных электронных системах статисти-ка квазичастиц может быть либо фермионной, либо бозонной. В двумерной электронной систе-ме, помещенной в магнитное поле, ситуация со статистикой квазичастиц кардинально изменяется. Становятся возможны самые различные энионные статистики в промежутке от бозонной до фермион-ной. Экспериментальные свидетельства того, что квазичастицы в двумерных электронных системах являются энионами, были продемонстрированы недавно. Показано, что в лафлиновской жидкости на факторе заполнения электронов $1/3$ заряжен-ные квазичастицы ведут себя как энионы со стати-стикой $\pi/3$ [1,2]. Таким образом, были получены первые прямые экспериментальные свидетельства существования энионной материи.

Учитывая то, что лафлиновская жидкость явля-ется диэлектриком, ее непосредственное исполь-зование для прикладных задач возможно посред-ством создания плотных ансамблей нейтральных возбуждений. Для этого необходимо ответить на вопрос, чем являются нейтральные возбуждения, рассматривая их как многочастичные нейтральные комплексы энионных квазичастиц. Теоретический консенсус на этот счет существует для магниторо-тонов — нейтральных возбуждений с единичным орбитальным моментом. Предполагается, что маг-ниторотоны являются бозонами, хотя проверить это утверждение в настоящее время не представля-ется возможным, так как магниторотоны хорошо

определены при больших обобщенных импульсах порядка обратной магнитной длины. При нулевом импульсе, случае наиболее интересном для экспе-риментальных исследований, магниторотоны по-падают в континуум многоротонных возбуждений и затухают.

Теоретически удастся выделить новую низко-энергетическую ветвь нейтральных возбуждений, выживающую при нулевом импульсе: ветвь маг-нитограви-тонов с орбитальным моментом 2. При-нято описывать магнитограви-тоны на языке воз-мущений пространственной метрики, введенной для системы черн-саймоновских квазичастиц [3]. Естественно, что с помощью дипольно-разрешен-ных оптических переходов создать подобные воз-буждения невозможно. Тем не менее, эксперимен-тально удалось создать условия для формирования плотных ансамблей не самих магнитограви-тонов, а их компаньонов с единичным спином (будем на-зывать их в дальнейшем «спин-магнитограви-тона-ми», хотя на данный момент неизвестен точный орбитальный момент этих возбуждений, и кор-ректность подобного названия может быть постав-лена под сомнение) [4].

Оказалось, что для наиболее исследованной лафлиновской жидкости на основе полупроводни-ковой системы GaAs/AlGaAs нейтральные возбуж-дения без изменения спинового квантового числа (магниторотоны и магнитограви-тоны), попадают в континуум возбуждений с изменением спиново-го квантового числа [4]. Таким образом, именно

спин-магнитогравитоны с нулевым импульсом, а не магнитогравитоны, представляет наибольший интерес для экспериментальных исследований нейтральных возбуждений. Как нижайшие по энергии возбуждения, спин-магнитогравитоны имеют беспрецедентно длинные времена жизни (более 10 с), что позволяет создавать новые материальные системы: лафлиновские растворы спин-магнитогравитонов контролируемой плотности, используя слабо разрешенные оптические переходы из валентной зоны в зону проводимости квантовой ямы с электронной системой. Появляется экспериментальная возможность полного насыщения лафлиновской жидкости возбуждениями, когда плотность спин-магнитогравитонов приближается к теоретически допустимому пределу (1/10 от плотности электронов в системе или 1/30 от плотности квантов магнитного потока) [5].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Лафлиновские растворы спин-магнитогравитонов, демонстрирует нелинейный оптический отклик (рис. 1), который объясняется новым типом рассеяния света: антистоксовым-стоксовым когерентным рассеянием света [6]. При этом типе рассеяния сохраняются энергия и продольный импульс налетающих и рассеянных фотонов. Соответственно, сигнал антистоксового-стоксового

когерентного рассеяния (аССР) света накладывается на сигнал отражения. Заметим, что в стандартных экспериментах по упругому рассеянию света отношение сигналов аССР и отражения света настолько мало, что отличить оптический сигнал первого процесса на фоне второго не представляется возможным. Однако нарушение симметрии по отношению к обращению времени в лафлиновской жидкости и сверхдлинные времена жизни спин-магнитогравитонов создают уникальную возможность прямого наблюдения этого интересного физического явления. Более того, при насыщении лафлиновской жидкости спин-магнитогравитонами с плотностью порядка 1/100 от плотности электронов, формирующих лафлиновскую жидкость, аССР становится доминирующим процессом рассеяния света. Аналогичный процесс рассеяния света должен был бы наблюдаться и для других типов возбуждений в твердом теле (фононов, плазмонов, магнонов и т.д.), однако из-за сложности отделения сигнала аССР от обратного упругого рассеяния света этот процесс рассеяния ранее экспериментально не детектировался.

Нелинейность интенсивности сигнала аССР определяется двумя процессами: спонтанным стоксовым рамановским рассеянием света, приводящим к созданию спин-магнитогравитонов (диаграмма (a) на рис. 1) и когерентным аССР (диаграмма (b) на рис. 1). Оптические процессы,

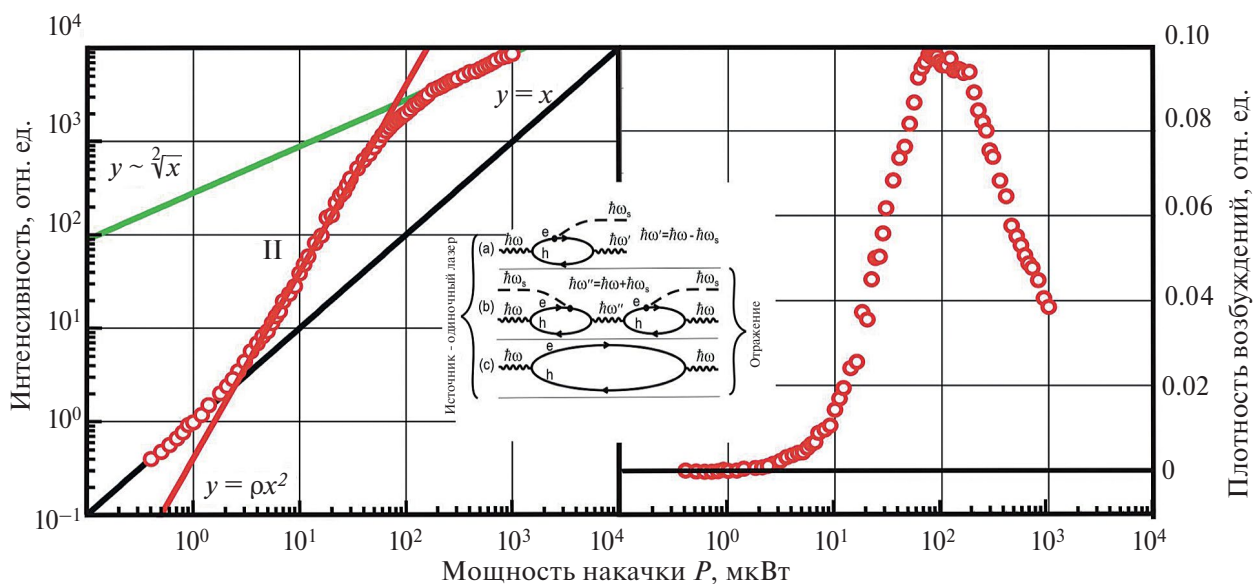


Рис. 1. Интенсивность сигнала упругого обратного рассеяния света в зависимости от мощности лазерного возбуждения (точки; слева). Интенсивность сигнала нормирована на коэффициент пропорциональности α из уравнения (1). Зеленая, черная и красная линии — корневая, линейная и квадратичная функции мощности возбуждения, соответственно. Оценочная плотность спин-магнитогравитонов в лафлиновской жидкости (в долях от плотности электронов) в зависимости от мощности возбуждения, полученная из зависимости слева, как $n \sim I/(\alpha P) - 1$ (справа). На вставке приведена схема трех оптических процессов: (a) — спонтанное стоксовое рамановское рассеяние света; (b) — когерентное антистоксовое-стоксовое рамановское рассеяние света (аССР); (c) — резонансное упругое обратное рассеяние света.

рассматриваемые в (b) и в (c) (упругое обратное рассеяние), могут быть описаны следующим уравнением: $I = \alpha P + \beta P n$, где I – интенсивность отраженного света, P – мощность лазерного возбуждения, n – полное число спин-магнитогравитонов в лафлиновской жидкости. Коэффициент α обозначает вероятность рассеяния света в (c). Этот коэффициент также учитывает способность нашей экспериментальной установки возбуждать электронную систему и собирать отраженный свет. Поэтому, поскольку точное значение α принципиально неизвестно, физический смысл имеет нормированная величина I/α . Вычисляя среднее число возбуждений, созданных в процессе (a) при условии стационарного возбуждения, получаем: $dn/dt = \gamma P - n/\tau = 0$, (2) где τ – время жизни спин-магнитогравитонов, а коэффициент γ обозначает вероятность рождения спин-магнитогравитона с нулевым импульсом в процессе (a) с учетом всех неизвестных нашей экспериментальной установки. Таким образом, получаем: $I/\alpha = P + \rho P^2$, с $\rho = \beta \gamma \tau / \alpha$, что дает квадратичную зависимость от мощности оптического возбуждения электронной системы.

На начальном этапе, когда число спин-магнитогравитонов в электронной системе невелико, в спектре отражения доминирует процесс (c) (рис. 1). При этом фотоны, возбуждающие электронную систему, участвуют в процессе (a). Дальнейшее увеличение мощности возбуждения активирует канал рассеяния (b), который определяется числом спин-магнитогравитонов в лафлиновской жидкости. В результате мы наблюдаем квадратичную зависимость сигнала от отражения. Как только плотность спин-магнитогравитонов достигнет максимально допустимого значения (полное насыщение лафлиновской жидкости возбуждениями), происходит насыщение каналов рассеяния (a) и (b); т.е. дальнейшее увеличение мощности лазерного возбуждения не приводит к нелинейному росту интенсивности сигнала аССР. Наоборот, наблюдается изменение исследуемой зависимости с квадратичной на сублинейную, что означает эффективное уменьшение средней плотности спин-магнитогравитонов в насыщенной возбуждениями лафлиновской жидкости под воздействием стационарного фото-возбуждения (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были исследованы нейтральные возбуждения с нулевым импульсом в лафлиновской жидкости на факторе заполнения электронов 1/3 (энионной материи), наиболее интересном случае с экспериментальной точки зрения. Обнаружено, что возбуждения с наименьшей энергией («магнитогравитоны»), связанные с изменением плотности лафлиновской жидкости, попадают в континуум возбуждений, изменяющих электронную плотность и спиновое квантовое число электронной системы одновременно. Таким образом нижайшими по энергии возбуждениями в лафлиновской жидкости оказываются «спин-магнитогравитоны», нейтральные возбуждения с беспрецедентно длинными для двумерных электронных систем временами жизни (более 10 с). Из-за столь длинных времен жизни появляется экспериментальная возможность создавать и исследовать новые квазиравновесные состояния энионной материи – лафлиновские растворы спин-магнитогравитонов с контролируемой плотностью растворенных спин-магнитогравитонов. В лафлиновских растворах, начиная с некоторой критической плотности спин-магнитогравитонов, наблюдается новый тип оптического рассеяния, который предположительно является антистоксовым-стоксовым когерентным рассеянием света на коллективе спин-магнитогравитонов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-12-00011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bartolomei H., Kumar M., Bisognin R. et al. // Science. 2020. V. 368. No. 6487. P. 173.
2. Nakamura J., Liang S., Gardner G.C., Manfra M.J. // Nature Physics. 2020. V. 16. P. 931.
3. Haldane F.D.M. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 116801.
4. Kulik L.V., Zhuravlev A.S., Musina L.I. et al. // Nature Commun. 2021. V. 12. P. 6477.
5. Gorbunov A.V., Larionov A.V., Kulik L.V., Timofeev V.B. // J. Appl. Phys. 2022. V. 132. Art. No. 244301.
6. Kulik L.V., Zhuravlev A.S., Larionov A.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2023. V. 123. Art. No. 083101.

Optical spectroscopy of an excited Laughlin liquid

L. V. Kulik^{1, *}

¹*Osipyan Institute of Solid-State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

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

Neutral excitations with zero momentum in a Laughlin liquid at an electron filling factor of $1/3$ have been studied. It was found that the lowest in energy are spin-magnetogravitons, excitations with a simultaneous change in the electron density in the Laughlin liquid and the spin quantum number of the electron system. The experimental possibility of the formation of new quasi-equilibrium states of anionic matter — Laughlin solutions of spin-magnetogravitons — is demonstrated. A new type of optical scattering is observed in Laughlin solutions.