Письма в ЖЭТФ, том 115, вып. 11, с. 736 – 739

Комментарий к статье “Бозе конденсация и спиновая сверхтекучесть магнонов в перпендикулярно намагниченной пленке железо-иттриевого граната” (Письма в ЖЭТФ 112(5), 314 (2020))

С. О. Демокритов[1), 2)]

University Muenster, 48149 Muenster, Germany

Поступила в редакцию 1 апреля 2022 г.
После переработки 22 апреля 2022 г.
Принята к публикации 26 апреля 2022 г.

DOI: 10.31857/S1234567822110106, EDN: imdtdp

В рассматриваемой статье, на мой взгляд, содержатся утверждения, не подкрепленные экспериментальными данными, а также некорректные формулировки.

Перед тем, как рассматривать результаты статьи по существу, хочу напомнить, что Бозе-Эйнштейновская конденсация (БЭК) описывает спонтанное формирование когерентного состояния в системе (квази-)частиц, находящейся в термодинамическом равновесии [1]. Однако, так как в реальных системах, где наблюдается БЭК, полностью равновесное состояние достигнуть невозможно, – в атомных конденсатах это связано с конечным временем жизни атомов при ультранизких температурах, в системах квазичастиц с их конечным временем жизни из-за релаксации в решетку – это определение было расширено на квазиравновесные системы. Тем не менее, даже при расширенном определении, например, лазерное излучение, сформированное за счет создания сильно неравновесной системы с инверсным заполнением, не относится к БЭК.

Таким образом, для подтверждения экспериментального наблюдения БЭК необходимо подтвердить а) когерентность полученного состояния, б) спонтанность обнаруженной когерентности и в) квазиравновесность рассматриваемой системы [2]. Замечу, что вместо того, чтобы демонстрировать выполнение перечисленных критериев, авторы вводят свои критерии, на которых остановимся позже.

В эксперименте на пленку железо-иттриевого граната (ЖИГа), помещенную в перпендикулярное магнитное поле с помощью полосковой линии шириной 0.2 мм подавалось когерентное микроволновое излучение (накачка) и измерялось поглощение как функция внешнего поля для разных мощностей накачки. Во второй серии экспериментов к однородному внешнему полю добавлялся градиент поля. При этом вторая полосковая линия, расположенная от первой на расстоянии 2 мм, измеряла сигнал, наведенный прецессией намагниченности. В определенных интервалах полей в первом случае наблюдалось поглощение микроволнового излучения, во втором случае детектировался наведенный сигнал. Эти результаты рассматриваются как доказательство формирования магнонного БЭК. Показано ли экспериментально, что критерии БЭК выполнены?

а) Когерентность: в статье нет данных по степени когерентности полученного состояния. Более того, первая серия экспериментов, где измерялась поглощенная мощность, не может дать информацию о степени когерентности состояния. Спектральный анализ сигнала наведенной прецессии намагниченности в принципе мог бы дать необходимую информацию. Однако эти данные в статье отсутствуют. Таким образом, можем заключить, что когерентность полученного состояния в статье не продемонстрирована.

б) Спонтанность: в случае атомного конденсата вопрос спонтанности не стоит, так как конденсат создается за счет охлаждения облака “некогерентных” атомов. В случае квазичастиц (особенно магнонов) ситуация более сложная, так как в систему инжектируются первичные магноны. Нужно быть уверенным, что первичные магноны не привнесут в систему внешнюю когерентность, связанную, например, с когерентной накачкой. В классических экспериментах по магнонной БЭК [3–5] эта проблема решалась за счет того, что первичные магноны накачивались на одной частоте, а формирование конденсата наблюдалось на другой частоте, сильно отличаю-

1) S.O. Demokritov.
2) e-mail: demokrit@uni-muenster.de

щейся от частоты первичных магнонов. Более того, изучался процесс термализации первичных магнонов [5] и было показано, что термализация происходит путем многократных неупругих столкновений, которые заведомо нарушают любую внешнюю когерентность. И, чтобы отмести последние сомнения, первичные магноны инжектировались не посредством FMR, который создает когерентные первичные магноны с фазой, определяемой фазой накачки, а с помощью параметрической накачки, так как хорошо известно [6], что в результате этого процесса инжектируются пары магнонов с произвольными фазами каждого магнона в паре. В рассматриваемой статье магноны инжектировались с помощью FMR. Чтобы лучше проанализировать данные, приведенные на рис. 2 рассматриваемой статьи, рассмотрим дисперсионный спектр, $f(k)$ спиновых волн в используемой геометрии, показанный на рис. 1 сплошной линией. Спектр посчитан для условий (толщина пленки, величина намагниченности, внешнее поле), близких к условиям описанных экспериментов с частотой накачки 3.7 ГГц. Очевидно, что микроволновое поле полосковой линии возбуждает магноны, соответствующие волновому числу $k = 0$ (или малым k в непосредственной близости от нуля из-за конечной ширины полосковой линии). При сканировании поля вниз при малых мощностях поглощение наблюдается в узком интервале полей, определяемом естественной шириной линии FMR и шириной области доступных для возбуждения волновых чисел. Однако при большей мощности накачки прецессия с большой амплитудой приводит к уменьшению статической намагниченности и, как правильно объяснено в рассматриваемой статье, нелинейному увеличению частоты (пунктирная линия на рис. 1), что обеспечивает выполнение резонансных условий при уменьшении внешнего поля. Таким образом резонансная кривая "затягивается" в сторону малых полей. И чем больше амплитуда прецессии, тем больше это затягивание. Отметим, однако, что независимо от мощности накачки и приложенного поля частота инжектированных магнонов определяется частотой накачки, которая близка к частоте FMR. Поскольку в рассматриваемой геометрии эта частота соответствует минимуму спектра ($f(k)$ есть монотонная функция), она и должна являться точкой конденсации. Таким образом, в этих экспериментах накачка инжектирует когерентные первичные магноны с частотой, совпадающей или очень близкой к частоте возможного конденсата. Поэтому говорить о спонтанности полученного когерентного состояния не приходится. В статье этот вопрос даже не рассматривается.

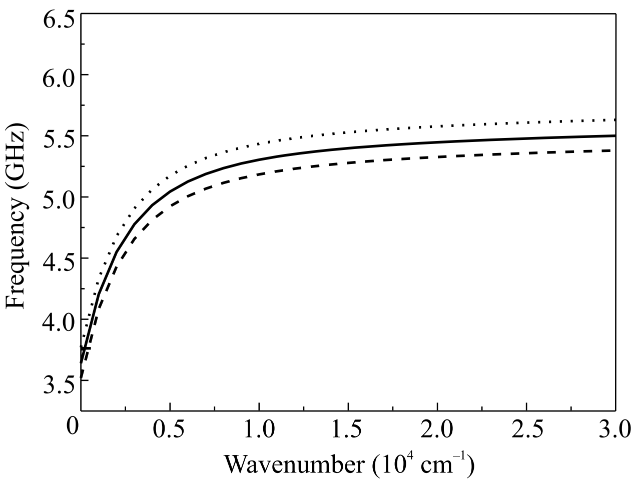

Рис. 1. Сплошная линия: дисперсионный спектр малоамплитудных спиновых волн в пленке ЖИГ (намагниченность $4\pi M = 1.75$ кГс) толщиной 6 мкм во внешнем поле 3.05 кЭ. Частота FMR 3.65 ГГц. Пунктирная линия: то же самое при большой амплитуде прецессии, приводящей к уменьшению статической намагниченности до $4\pi M = 1.71$ кГс. Частота FMR 3.75 ГГц. Штриховая линия: то же самое, что и сплошная линия, но в поле 3.00 кЭ. Горизонтальная полочка иллюстрирует частоту накачки 3.70 ГГц. Видно, что увеличение амплитуды прецессии сдвигает спектр в большие частоты, а уменьшение поля в меньшие частоты

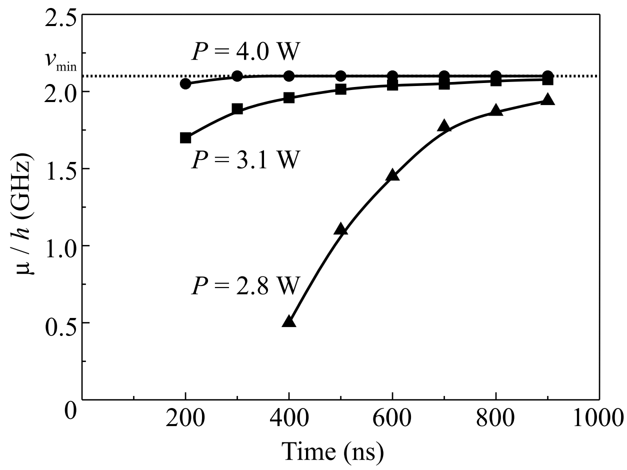

Рис. 2. Из [4]. Изменение химического потенциала газа магнонов в пленке ЖИГ толщиной 6 мкм со временем после включения накачки с разной мощностью

в) Квазиравновесность: так как первичные магноны инжектируются с частотой, совпадающей или очень близкой к частоте минимума спектра, их термализация, т.е. перераспределение по существенной части магнонного спектра сильно затруднена. Действительно, все остальные магноны имеют большую частоту, поэтому такой эффективный механизм магнон-магнонного взаимодействия, как обменное четырех-магнонное рассеяние, запрещен законом сохранения энергии. Более того, слабое релятивистское трех-магнонное слияние двух магнонов в один магнон большей частоты запрещено законом сохранения импульса. Приходится отмечать, что авторы статьи даже не обсуждают эту проблему.

Таким образом, выполнение общепризнанных критериев БЭК экспериментально не подтверждено. Вместо этого авторы вводят собственные критерии БЭК и делаются некорректные утверждения. Например, читаем на с. 315: "Важное наблюдение заключается в том, что мощность, поглощаемая образцом, не зависит от мощности, подаваемой на полосок. Это ...полностью соответствует свойствам магнонного БЭК" и далее на с. 315–316: "состояние мБЭК полностью определяется его химическим потенциалом, который зависит от частоты накачки, но не от ее амплитуды". Эти утверждения противоречат физической картине формирования БЭК в системе квазичастиц. Химический потенциал и температура определяют свойства неконденсированных магнонов: при нулевой мощности накачки, в равновесном состоянии химический потенциал газа магнонов равен нулю. Для повышения химического потенциала и нужна накачка: чем мощнее накачка, тем больше дополнительных магнонов внесено в систему, тем больше химический потенциал. Рисунок 2, взятый из [4], иллюстрирует этот факт: показан химический потенциал газа магнонов в ЖИГе как функция времени после включения накачки для разных мощностей накачки. Очевидно, что при малой мощности (2.8 Вт) рост химического потенциала медленный, в то время как при большой мощности (4.0 Вт) химический потенциал быстро достигает своего критического значения, при котором начинается БЭК. Хотя при этом, как правильно отмечено в рассматриваемой статье, достигается критическая плотность дополнительно инжектированных магнонов, утверждение, что "состояние мБЭК полностью определяется его химическим потенциалом" ошибочно. Действительно, после достижения критической величины химический потенциал не меняется. Однако, это только означает, что не меняется плотность неконденсированных магнонов, в то время как при дальнейшем увеличении числа инжектированных магнонов все эти магноны (или их большая часть, если учитывать конечное время жизни магнонов) добавляются к конденсату [1]. Поэтому наблюдаемый эффект насыщения поглощаемой мощности при увеличении мощности накачки никоим образом не может быть критерием конденсации.

Также утверждается, что "... свойством мБЭК является то, что он должен заполнять все пространство, в котором эффективное магнитное поле меньше, чем соответствующая частота накачки" (с. 316). Действительно, если эффективное магнитное поле, определяющее частоту конденсата, меньше частоты накачки (отмеченной на рис. 1 горизонтальной полочкой), то спектр спиновых волн соответствует штриховой линии на рис. 1. При этом, как видно из этого рисунка, инжектируются магноны с ненулевым волновым числом и, соответственно, ненулевой групповой скоростью. Такие магноны, независимо от того, формируют они конденсат или нет, распространяются за пределы области накачки.

Особое внимание хочется уделить утверждению об обнаружении сверхтекучего движения магнонов. В статье не дается подтверждения сверхтекучести движения и даже не указаны использованные критерии сверхтекучести. Вместо этого вывод основывается на аналогии со сверхтекучим He^3. Эта аналогия представляется весьма сомнительной. Действительно, причиной сверхтекучего спинового тока в He^3 является сверхтекучий перенос массы, который, естественно, запрещен в твердом ЖИГе.

В целом, ситуация со сверхтекучестью в магнонном БЭКе в ЖИГе остается довольно противоречивой. Очевидно, что сверхтекучести в понимании бездиссипативного движения наблюдаться не должно, так как даже покоящийся конденсат с постоянной плотностью требует для своего поддержания внешний поток энергии и углового момента из-за конечного времени жизни магнонов. Надо отметить, однако, что в [7] при описании затекания БЭК в потенциальную яму с помощью простой модели, основанной на модифицированном уравнении Гросса–Питаевского, было обнаружено, что характерное время, описывающее релаксацию линейного импульса конденсата почти на два порядка больше, чем собственное время жизни магнона. Это обстоятельство можно рассматривать как косвенный индикатор сверхтекучести. Однако нельзя исключить, что полученный результат связан с несовершенством теоретической модели. И наконец, попытки определить сверхтекучий ток без привязки к диссипации, а как поток магнонов, не вызванный градиентом магнонной плотности, а вызванный градиентом фазы спиновой волны, не приводят к интересным последствиям, так как такие потоки наблюдаются в магнонных пучках и без БЭК.

Суммируя все вышесказанное, считаю, что предложенные в статье критерии образования конденсата таковыми не являются, а признанные критерии конденсации не проверены, а, значит, что утверждение об обнаружении магнонного БЭК и магнонной сверхтекучести, сделанные в статье, не подтверждены экспериментальными данными.

1. A. Einstein, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss., Phys. Math. Kl. **1**, 3 (1925).
2. D. Snoke, Nature (London) **443**, 403 (2006).
3. S. O. Demokritov, V. E. Demidov, O. Dzyapko, G. A. Melkov, A. A. Serga, B. Hillebrands, and A. N. Slavin, Nature (London) **443**, 430 (2006).
4. O. Dzyapko, V. E. Demidov, S. O. Demokritov, G. A. Melkov, and A. N. Slavin, J. Appl. Phys. **101**, 09C103 (2007).
5. V. E. Demidov, O. Dzyapko, S. O. Demokritov, G. A. Melkov, and A. N. Slavin, Phys. Rev. Lett. **99** 037205 (2007).
6. A. G. Gurevich and G. A. Melkov, *Magnetization Oscillations and Waves*, CRC, N.Y. (1996).
7. I. V. Borisenko, B. Divinskiy, V. E. Demidov, G. Li, T. Nattermann, V. L. Pokrovsky, and S. O. Demokritov, Nat. Commun. **11**, 1691 (2020).