Письма в ЖЭТФ, том 115, вып. 11, с. 740 – 742

Ответ на комментарий к статье "Бозе-конденсация и спиновая сверхтекучесть магнонов в перпендикулярно намагниченной пленке железо-иттриевого граната" (Письма в ЖЭТФ 112(5), 314 (2020))

Ю. М. Буньков[1)]

Российский Квантовый Центр, 143025 Сколково, Москва, Россия

Поступила в редакцию 19 апреля 2022 г.
После переработки 22 апреля 2022 г.
Принята к публикации 26 апреля 2022 г.

Единство законов физики позволяет применять единый подход к различным физическим системам. Бозе-конденсация магнонов (мБЭК) и связанное с этим явление магнонной сверхтекучести было открыто почти 40 лет тому назад в антиферромагнитном сверхтекучем ^{3}He. Затем явление БЭК было обнаружено в ряде других систем – в газе ультрахолодных атомов, в газе экситон-поляритонов и т.д. Магнонный БЭК был в дальнейшем обнаружен в антиферромагнетиках со связанной ядерно-электронной прецессией и в пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ). Причем в пленках свойства магнонного БЭК принципиально различны при ориентации магнитного поля, вдоль или поперек плоскости пленки. В этой краткой стате мы осветим основные свойства мБЭК, и в частности, различие между "классическим" мБЭК для магнонов с $\mathbf{k} = 0$ и "экзотическим" мБЭК для магнонов с ненулевым импульсом.

DOI: 10.31857/S1234567822110118, EDN: imenhq

Эта статья является ответом на критические замечания [1] по поводу результатов эксперимента в пленке железо-иттриевого граната (ЖИГ), намагниченной перпендикулярно [2], в котором было продемонстрировано пространственное распространение когерентных магнонов за пределы области их возбуждения. В статье [2] речь идет об одном конкретном эксперименте. Для понимания результатов этого эксперимента, является императивом изучение всего комплекса проведенных ранее исследований магнонного БЭК, ссылки на которые даны в статье.

Бозе-конденсация магнонов и связанное с этим явление магнонной сверхтекучести было открыто почти 40 лет тому назад в антиферромагнитном сверхтекучем ^{3}He [3]. Именно они и проливают свет на данное явление. Сверхтекучий антиферромагнитный ^{3}He является уникальной системой, в которой можно изучать многие закономерности квантовой теории поля и квантовых возбуждений. В ней удается исследовать и моделировать различные другие физические системы. Ее можно рассматривать как квантовый вакуум основного состояния и набор различных квазичастиц – фермионов (квазичастицы), бозонов (магнонов и фононов, а также частиц майорано) и т. д. [4, 5]. Кроме того, в нем можно наблюдать точечные, одномерные и двумерные топологические дефекты, а также различные квантовые поля [6]. В частности, в ^{3}He были проведены уникальные эксперименты, подтверждающие образование космических струн после Большого взрыва [7].

При переходе ^{3}He в сверхтекучее состояние, помимо нарушения калибровочной симметрии, происходит независимое нарушение спиновой и орбитальной симметрии с образованием антиферромагнитного жидкого кристалла. Именно комбинация сразу трех нарушений симметрии и делает ^{3}He уникальной системой для фундаментальных исследований. С точки зрения магнитных свойств уникальность ^{3}He заключается в том, что время жизни магнонов является рекордно большим. Величина затухания Гильберта может составлять 10^{-8}. Благодаря столь малому затуханию и удалось наблюдать экспериментально Бозе-конденсацию магнонов, при которой ширина резонансной линии сужалась в 1000 раз [8–10]. В этих экспериментах радиочастотный импульс возбуждал магноны с волновым вектором $\mathbf{k}$, близким к нулю и энергетическому минимумы спектра магнонов. Однако, несмотря на когерентность возбуждения, образующиеся магноны имели разброс частот за счет неоднородности магнитного поля. В демонстрационном эксперименте, проведенном в градиенте магнитного поля, ширина линии ядерного маг-

[1)]e-mail: y.bunkov@rqc.ru

нитного резонанса (ЯМР) составляла 500 Гц и сигнал индукции спадал за время около 2 мс [11]. После возбуждающего импульса сигнал индукции полностью пропадал за счет расфазировки магнонов. Однако через 10 мс когерентность магнонов спонтанно восстанавливалась и спектральная ширина линии уменьшалась до 0.5 Гц! Именно спонтанное восстановление когерентности прямо демонстрирует Бозе-конденсацию магнонов.

В экспериментах с антиферромагнитным ^{3}He-B были обнаружены все сверхтекучие свойства магнонного Бозе-конденсата, такие как эффект Джозефсона и переход в режим сброса фазы, измерена критическая скорость Ландау, обнаружено образование квантовых вихрей, получены Голдстоуновские моды колебаний (второй звук) и т. д. Описание этих эффектов можно найти в книге [12] и в статьях автора. Следует отметить, что комплексное исследование магнонного БЭК и магнонной сверхтекучести в ^{3}He получило широкое международное признание.

Некоторые исследователи задаются вопросом, применимы ли результаты экспериментов по мБЭК в антиферромагнитном ^{3}He к другим магнитоупорядоченным веществам. На этот вопрос следует ответить весьма положительно. Конечно, при этом следует исходить из модели Хольштейна–Примакова, а не квазиклассической теории прицессии макроспинов, которая, конечно, не применима для описания квантовых явлений. В одной из интерпретаций магнонной сверхтекучести в ^{3}He была применена модель противотока сверхтекучих жидкостей с противоположной намагниченностью. Однако для явления магнонной сверхтекучести достаточно существование пространственной подвижности магнонов. При этом возникает как нормальный поток магнонов при градиенте химического потенциала, так и сверхтекучий поток при градиенте фазы волновой функции Бозе-конденсата. При этом релаксация плотности магнонов не имеет значения для данной классификации.

Фундаментальным вопросом для образования Бозе-конденсата является знак взаимодействия между квазичастицами. В случае магнонов в ^{3}He-B магноны отталкиваются. Это приводит к увеличению частоты прецесии при увеличении плотности магнонов и устойчивости магнонного БЭК. Напротив, в ^{3}He-A магноны притягиваются, что приводит к неустойчивости однородной прецессии [13].

В настоящее время большой интерес прикован к экспериментам по магнонной Бозе-конденсации в пленках ЖИГ, в которых это явление можно наблюдать даже при комнатной температуре. В зависимости от направления магнитного поля вдоль или поперек поверхности пленки знак взаимодействия магнонов меняется. Так, в случае намагничивания по нормали магноны отталкиваются, как и в ^{3}He-B. При этом минимум энергии соответствует стоячим магнонам с $\mathbf{k} = 0$. Поэтому образуется устойчивое состояние магнонного Бозе-конденсата [14]. Напротив, при тангенциальной намагниченности пленки ЖИГ магноны притягиваются, что делает неустойчивой однородную прецессию с $\mathbf{k} = 0$. Однако в этих условиях возникает нетривиальный спектр магнонов, минимум энергии которых соответствует магнонам, бегущим вдоль поля и имеющим волновой вектор $\mathbf{k}$ около 10^5 см$^{-1}$. Другими словами, в этой системе магноны имеют импульс, что кардинально отличает ее от классических систем с атомарным БЭК и с БЭК магнонов в ^{3}He-B. Именно в этих условиях были обнаружены эффекты, которые можно трактовать как образование магнонного БЭК для магнонов с ненулевым волновым вектором, начиная с работы [15]. Наиболее доказательной демонстрацией образования БЭК бегущих магнонов являются результаты эксперимента, опубликованные в [16]. Можно назвать такой мБЭК экзотическим. Часть замечаний автора комментария [1] обусловлена именно тем, что его работы связаны с этим экзотическим мБЭК, а не с классическим, о котором идет речь в [2].

Рассмотрим основные различия между этими двумя типами мБЭК а также между мБЭК, в ^{3}He и в ЖИГ. Во-первых, возникает вопрос о концентрации магнонов, необходимой для образования классического мБЭК. В антиферромагнитном ^{3}He магнонная Бозе-конденсация наступает при достаточно малой концентрации магнонов [3], в то время, как в ЖИГ, при комнатной температуре, их концентрация должна быть доведена до уровня, соответствующего отклонению прецессирующей намагниченности (в классической интерпретации) на угол порядка 2.5 градусов [17]. Другое различие заключается в том, что наиболее совершенные образцы ЖИГ характеризуются константой затухания Гильберта не лучше, чем 10^{-5}, что на три порядка хуже, чем в ^{3}He. Однако и при этих условиях удается наблюдать эффекты, связанные с мБЭК и магнонной сверхтекучестью. В частности, в [2] опубликованы результаты по переносу мБЭК из области возбуждения магнонов. Этот эксперимент аналогичен эксперименту в ^{3}He-B, опубликованному в [18].

Одно из замечаний автора комментария [1] заключается в том, что спиновые волны также могут переносить магноны из области возбуждения в область расположения антенны. Однако в нашем случае антенной служит полосковая линия шириной 0.2 мм, которая чувствительна только к прецессии с малым волновым вектором. При этом следует учитывать, что частота однородной прецессии увеличивается с увеличением плотности магнонов. В условиях прохождения магнонов в область антенны этот динамический сдвиг частоты за счет взаимодействия магнонов в точности равен изменению частоты прецессии из-за градиента магнитного поля между полосковыми линиями.

Другое замечание связано с рассмотрением перегрева магнонной системы в процессе накачки магнонов. Действительно, в случае экзотического мБЭК магноны возбуждаются параметрической накачкой на частоте, существенно выше энергии конденсата. Поэтому наблюдение мБЭК возможно только через некоторое время после выключения накачки и термализации облака магнонов [16]. В случае классической Бозе-конденсации в эксперименте [2] энергия магнонов равна частоте возбуждающих фотонов. При этом возникает гибридное состояние магнонов и радиочастотных фотонов в резонаторе. В непрерывном режиме радиочастотные фотоны резонатора возбуждают магноны именно с той фазой и на той частоте, которые соответствуют образовавшемуся магнонному Бозе-конденсату [19]. Этот процесс является квазиравновесным, в силу квантового принципа когерентного рождения новых магнонов в состоянии существующего Бозе-конденсата. В результате магнонный конденсат не перегревается, что было продемонстрировано в экспериментах с ^{3}He, теплоемкость которого при сверхнизких температурах черезвычайно мала. МБЭК не перегревался даже при отклонении намагниченности на угол более 120°.

Ну и наконец последнее замечание: "при дальнейшем увеличении (мощности) все магноны добавляются к конденсату" относится к параметрическому возбуждению, с которым автор комментария обычно работает, но не к резонансному возбуждению мБЭК фотонами. Как было показано в классических работах по магнонному БЭК, фазы магнонного БЭК и фотонов в резонаторе отличаются на величину, которая определяется равновесием между возбуждением магнонов и их испарением. Поэтому разность фаз автоматически устанавливается так, что число возбуждаемых магнонов равно числу испарившихся (см. [20], рис. 6, а также [14]). Поэтому даже при увеличении мощности накачки плотность магнонов в мБЭК не меняется.

В заключение хочу согласиться, что ситуация с образованием и свойствами экзотического мБЭК действительно весьма противоречива. В частности, возникает законный вопрос об образовании мБЭК в условиях притяжения магнонов. Однако свойства классического мБЭК для магнонов с $\mathbf{k} = 0$, результаты исследования которого опубликованы в статье [2], лишены этих проблем. Суммируя все вышесказанное, считаю, что замечания в комментарии [1] сделаны без учета отличий классического мБЭК от экзотического.

Эта работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект # 22-12-00322).

1. С. О. Демокритов, Письма в ЖЭТФ **115**(11) (2022).
2. П. М. Ветошко, Г. А. Князев, А. Н. Кузмичев, А. А. Холин, В. И. Белотелов, Ю. М. Буньков, Письма в ЖЭТФ **112**, 313 (2020).
3. G. E. Volovik, J. Low Temp. Phys. **153**, 266 (2008).
4. Yu. M. Bunkov, Philos. Trans. R. Soc. A **366**, 2821 (2008).
5. Yu. M. Bunkov and R. R. Gazizulin, Sci. Rep. **10**, 20120 (2020).
6. G. E. Volovik, *The Universe in a Helium Droplet*, Oxford University Press, Oxford (2003).
7. C. Bäuerle, Yu. M. Bunkov, S. N. Fisher, H. Godfrin, and G. R. Pickett, Nature **382**, 332 (1996).
8. A. S. Borovik-Romanov, Yu. M. Bunkov, V. V. Dmitriev, and Yu. M. Mukharskii, JETP Lett. **40,** 1033 (1984).
9. Yu. M. Bunkov, S. N. Fisher, A. M. Guenault, and G. R. Pickett, Phys. Rev. Lett. **69**, 3092 (1992).
10. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, Phys. Rev. Lett. **98**, 265302 (2007).
11. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, J. Phys.: Condens. Matter **22**, 164210 (2010).
12. Yu. M. Bunkov and G. E. Volovik, *Spin superfluidity and magnon BEC*, in *Novel Superfluids*, ed. by K. H. Bennemann and J. B. Ketterson, Oxford University press, Oxford (2013).
13. A. S. Borovik-Romanov, Yu. M. Bunkov, V. V. Dmitriev, and Yu. M. Mukharskiy, JETP Lett. **39**, 469 (1984).
14. Yu. M. Bunkov, A. N. Kuzmichev, T. R. Safin, P. M. Vetoshko, V. I. Belotelov, and M. S. Tagirov, Sci. Rep. **11**, 7673 (2021).
15. G. A. Melkov, V. L. Safonov, A. Yu. Taranenko, and S. V. Sholom, J. Magn. Magn. Mater. **132**, 180 (1994).
16. D. A. Bozhko, P. Clausen, A. V. Chumak, Yu. V. Kobljanskyj, B. Hillebrands, and A. A. Serga, Low Temp. Phys. **41**, 1024 (2015).
17. Yu. M. Bunkov and V. L. Safonov, Journal MMM **452,** 30 (2018).
18. A. S. Borovik-Romanov, Yu. M. Bunkov, V. V. Dmitriev, Yu. M. Mukharskiy, and D. A. Sergatskov, Phys. Rev. Lett. **62**, 1631 (1989).
19. R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics (1963), The New Millennium eddition*, https://www.feynmanlectures.caltech.edu/.
20. A. S. Borovik-Romanov, Yu. M. Bunkov, V. V. Dmitriev, Yu. M. Mukharskii, E. V. Poddyakova, and O. D. Timofeevskaya, Sov. Phys. JETP **69**, 542 (1989).