

ОТВЕТ НА КОММЕНТАРИЙ К РАБОТЕ «СИММЕТРИЙНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ О РАСШИРЕНИИ ГАЗОВ В ВАКУУМ»

Е.А. Кузнецов^{a,b,c}, М.Ю. Каган^{d,e}*

^a *Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Москва, Россия*

^b *Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук
Черноголовка, Московская обл., Россия*

^c *Сколковский Институт науки и технологии
Сколково, Московская обл., Россия*

^d *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Москва, Россия*

^e *Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук
Москва, Россия*

Поступила в редакцию 28 марта 2023 г.,
после переработки 31 марта 2023 г.
Принята к публикации 31 марта 2023 г.

Ответ на комментарий П. Л. Чаповского к работе «Симметричный подход в задаче о расширении газов в вакуум», ЖЭТФ **159**, 794 (2021).

DOI: 10.31857/S0044451023080047
EDN:HZJHGL

Комментарий [1] к нашей работе [2] с нашей точки зрения основан на заключительном абзаце нашей статьи, который и стал предметом критики Чаповского. В нем содержится по сути ответ на данный комментарий. Приводим этот абзац полностью:

«Что касается разлета бозе-атомов, то в эксперименте [3] наблюдалась примерно та же самая последовательность изменения формы облака, что и в трехмерной задаче Анисимова–Лысикова. Это свидетельствует о том, что нормальная компонента играет в этом эксперименте более существенную роль, чем сверхтекучая компонента. Напомним, что одним из ключевых экспериментов по открытию бозе-эйнштейновских конденсатов газов щелочных элементов ${}^7\text{Li}$, ${}^{23}\text{Na}$, ${}^{87}\text{Rb}$ [4–6] было определение функции распределения бозе-атомов при расширении газа в вакуум, после выключения оптической ловушки. Функция распределения имела бимодальную форму, которая соответствовала нормальной и

сверхтекучей компонентам. Для нормальной компоненты распределение по скоростям было широким — тепловым — максвелловского вида, а сверхтекучая компонента обладала более узким распределением с шириной, определяемой параметром взаимодействия (в смысле Гросса–Питаевского). При малых, но конечных температурах из-за падения плотности при разлете температура бозе-конденсации падает, что неизбежно должно приводить к росту числа атомов нормальной компоненты. По этой причине форма облака должна определяться нормальной компонентой, которую можно считать одноатомным газом. Холодная сверхтекучая компонента будет сосредоточена внутри расширяющегося облака. Для ферми-газов эта ситуация, по-видимому, также имеет место. В отличие от бозе-газов, переход к нормальной компоненте при разлете ферми газа будет сопровождаться также и разрушением куперовских пар. Таким образом, разлет квантового газа должен приводить к появлению колец Ньютона, что как в экспериментах [3], так и в [7] и [8] не наблюдалось. Наблюдение таких осцилляций, по крайней мере на начальной стадии разлета, было бы свидетельством того, что газ находится в квантовом состоянии.»

* E-mail: kuznetso@itp.ac.ru

Во-первых, мы должны отметить, что не очень корректно сослалась на статью [3]. Более полное изложение эксперимента содержится в работе автора комментария [9]. Экспериментальные данные этой работы (см. рис. 6, правая колонка), приведенные также в тексте комментария, показывают, что при разлете квантового газа бозе-атомов (находящегося в конденсатном состоянии) в вакуум имеет место та же последовательность, что и для разлета ферми-газа [7]. Для ферми газа в унитарном пределе этот факт может и выглядеть естественно, поскольку в квазиклассическом пределе разлет такого газа соответствует идеальному газу с $\gamma = 5/3$. Как было показано впервые Анисимовым и Лысыковым [10], если начальное распределение идеального газа имеет форму банана, то асимптотически его форма деформируется в блин в поперечном направлении к начальному распределению. При разлете бозе-газа в вакуум, если он изначально находился в конденсатном состоянии, **последовательность форм должна быть другой**. В этом случае разлет бозе-газа может быть описан с помощью уравнения Гросса–Питаевского, для которого квазиклассический предел соответствует газу с $\gamma = 2$. Вопрос о гидродинамическом разлете для $\gamma \neq 5/3$ был рассмотрен, в частности в книге [11], где можно найти соответствующие ссылки.

Заметим, что автор [1] в последующих работах [3, 12] использовал уравнение Гросса–Питаевского для описания двухкомпонентного разлета бозе-газа при конечной температуре, ниже критической, и получил осцилляции также для сверхтекучей компоненты. Мы не возражаем против этого результата и считаем его вполне естественным. При этом утверждение об уменьшении плотности атомов в центре разлетающегося облака требует более тщательного анализа и решения задачи с зацепляющимися уравнениями для профилей плотности конденсатных и надконденсатных частиц с учетом частого доминирования нормальной (тепловой) плотности во многих классических экспериментах (см. Комментарий [16] на работу автора [3] и обзор [17]).

Во-вторых, наша работа не претендует «на изменение трактовки сотен экспериментов по ВЕС» и на какую-либо ревизию в этой области, о чем пишет автор комментария на стр. 1. В наших работах (см. также [13–15]) рассмотрен разлет квантовых газов при температуре $T \rightarrow 0$ со степенной зависимостью химпотенциала μ от плотности n с показателем $\nu = 2/d$. Эксперимент [9], вообще говоря, не подпадает под эту теорию, за исключением того, что уже

написано выше про последовательность форм разлетающегося облака.

В наших работах сформулирована проблема о проявлении эффектов квантового давления при трехмерном разлете квантовых газов. Эта задача требует теоретических и численных исследований, равно как и выполнения соответствующих экспериментов. Следует отметить, что в численном эксперименте [18], моделирующем одномерный разлет бозе газа в вакуум в рамках уравнения Гросса–Питаевского, на краю облака наблюдаются осцилляции - аналог колец Ньютона в одномерной системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Л. Чаповский, ЖЭТФ **164**, XXX (2023).
2. Е. А. Кузнецов, М. Ю. Каган. ЖЭТФ **159**, 794 (2021) [JETP **132**, 704 (2021)].
3. Ю. В. Лиханова, С. Б. Медведев, М. П. Федорук, П. Л. Чаповский. Письма ЖЭТФ **103**, 452 (2016) [JETP Letters **103**, 403 (2016)].
4. M.H. Anderson, J.R. Ensher, M.R. Matthews, C.E. Wieman, and E.A. Cornell. *Science* **269**, 198 (1995).
5. C.I. C Bradley, C.A. Sackett, J.J. Tollett, and R.G. Hulet. *Phys. Rev. Lett.* **75**, 1687 (1995).
6. K.B. Davis, M.-O. Mewes, M.R. Andrew, N.J. van Druten, D.S. Durfee, D.M. Kurn, and W. Ketterle. *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3969 (1995).
7. K.M. O'Hara, S.L. Hemmer, M.E. Gehm, S.R. Granade, and J.E. Thomas. *Science* **298**, 2179 (2002).
8. E. Elliott, J.A. Joseph, and J.E. Thomas. *Phys. Rev. Lett.* **112**, 040405 (2014).
9. П.Л. Чаповский, Письма ЖЭТФ **95**, 148 (2012).
10. С.И. Анисимов, Ю.И. Лысыков, ПММ, **34** 926-929 (1970) [S. I Anisimov and Yu. I Lysikov, J. Appl. Math. and Mech. **34**, 882 (1970)].
11. S. I Anisimov and V. A Khokhlov, *Instabilities in Laser-Matter Interaction*, CRC Press Inc., Boca Raton-London-Tokyo (1995).

12. Ю.В. Лиханова, С.Б. Медведев, М.П. Федорук, П.Л. Чаповский. Письма в ЖЭТФ **100**, 935 (2014).
13. E.A. Kuznetsov, M. Yu. Kagan, A. V. Turlapov, arXiv:1903.04245 [cond-mat.quant-gas] (2019).
14. E.A. Kuznetsov, M. Yu. Kagan, A. V. Turlapov, Phys. Rev. **101**, 043612 (2020).
15. Е.А.Кузнецов, М.Ю. Каган, ТМФ **202**, 458 (2020).
16. А.И. Сафонов, И.И. Сафонов, И.С. Ясников, Комментарий к статье [3], Письма в ЖЭТФ, **103**, 896, (2016).
17. F. Dalfovo, S. Giorgini, L.P. Pitaevskii, and S. Stringari, Rev. Mod. Phys. **71**, 463 (1999).
18. S. K. Ivanov and A. M. Kamchatnov, Phys. Rev. A **99**, 013609 (2019).