

# РАЗЛЕТ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ БОЗОНОВ ИЗ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКИ. КОММЕНТАРИЙ К СТАТЬЕ Е. А. КУЗНЕЦОВА, М. Ю. КАГАНА «СИММЕТРИЙНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ О РАСШИРЕНИИ ГАЗОВ В ВАКУУМ»

*П. Л. Чаповский\**

*Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук  
630090, Новосибирск, Россия*

*Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук  
630090, Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 10 марта 2023 г.,  
после переработки 31 марта 2023 г.  
Принята к публикации 31 марта 2023 г.

Показано, что аргументы работы Е. А. Кузнецова и М. Ю. Кагана, ЖЭТФ 159, 794 (2021), не дают оснований сомневаться в достоверности стандартной диагностики бозе-эйнштейновской конденсации разреженных газов в ловушках по разлету конденсатов в вакуум.

*Статья представлена в рамках публикации материалов конференции  
«Физика ультрахолодных атомов» (ФУХА-2022), Новосибирск, декабрь 2022 г.*

**DOI:** 10.31857/S0044451023080035  
**EDN:** HZIKRJ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] выполнено теоретическое исследование расширения классических и квантовых газов из ловушки в вакуум и показано, что классические и квантовые газы могут иметь при разлете близкие формы. Поэтому, согласно [1], форма разлетающейся облака не может служить однозначным признаком достижения бозе-эйнштейновской конденсации (ВЕС). Вместо этого в работе [1] предложено детектировать ВЕС по появлению осцилляций плотности (колец Ньютона [1]) на границе расширяющегося облака — характеристики, которая существует только у квантовых газов.

В Заключении работы [1] сказано: «Таким образом, разлет квантового газа должен приводить к появлению колец Ньютона, что в экспериментах как [2], так и [3, 4] не наблюдалось. Наблюдение таких осцилляций, по крайней мере на начальной ста-

дии разлета, было бы свидетельством того, что газ находится в квантовом состоянии».

Работа [1] претендует на изменение трактовки сотен экспериментов по ВЕС разреженных газов, в том числе ее первых наблюдений в работах [5–7]. В настоящем Комментарии показано, что аргументы работы [1] не дают оснований сомневаться в достоверности стандартной диагностики ВЕС разреженных газов в ловушках по разлету конденсатов в вакуум.

## 2. БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКАЯ КОНДЕНСАЦИЯ

Бозе-эйнштейновская конденсация была предсказана Эйнштейном в 1925 году. Для конденсации идентичных, невзаимодействующих между собой и свободных бозонов необходимо достижение фазовой плотности  $\rho$ , большей критической,

$$\rho \equiv n\lambda_{dB}^3 \geq 2.612, \quad (1)$$

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k_B T}}.$$

Здесь  $\lambda_{dB}$ ,  $n$  и  $m$  — длина волны де Бройля частиц газа, плотность и масса бозонов,  $T$  — темпе-

\* E-mail: chapovsky@iae.nsk.su

ратура газа,  $h$  — постоянная Планка,  $k_B$  — постоянная Больцмана. Конденсация свободных бозонов осуществляется в низшем энергетическом состоянии с нулевым импульсом. Для бозонов в гармонической ловушке условие (1) необходимо выполнить в центре ловушки [8]. Конденсация бозонов в ловушке осуществляется в низшем энергетическом состоянии ловушки.

В существующих экспериментальных установках размер бозе-конденсата оказывается слишком мал для его детального изучения непосредственно в ловушке. Поэтому со времени открытия ВЕС разреженного газа в 1995 году стандартным методом диагностики состояния газа стало наблюдение разлета облака частиц после выключения ловушки.

Достижение критической фазовой плотности занимает центральное место во всех экспериментах по бозе-конденсации разреженных газов. Для этого разработана уникальная технология, которая позволяет охладить газ до температур порядка  $10^{-7}$  К, а фазовую плотность газа увеличить на 19 порядков. Опишем процедуру достижения критической фазовой плотности и бозе-конденсации в наших экспериментах [2, 9], в которых использовалась стандартная диагностика ВЕС. Из паров рубидия природного изотопного состава, находящихся при давлении порядка  $10^{-8}$  Торр и комнатной температуре (фазовая плотность  $\rho \sim 10^{-19}$ ), примерно  $3 \cdot 10^9$  атомов  $^{87}\text{Rb}$  захватываются в магнитооптическую ловушку и охлаждаются в ней до температуры порядка  $10^{-4}$  К. Далее, атомы рубидия помещаются в слабое однородное магнитное поле и оптически перекачиваются на зеemanовский уровень  $M_F = 2$  сверхтонкого состояния  $F_g = 2$  основного электронного состояния  $^{87}\text{Rb}$ . Атомы рубидия в этом состоянии можно удерживать консервативными магнитными ловушками. Далее, захваченные атомы адиабатически переносятся в глубокую квадрупольную магнитную ловушку и в ней транспортируются в высоковакуумную зону экспериментальной установки с низким давлением рубидия (фазовая плотность атомов в магнитной ловушке на этом этапе составляет  $\rho = 10^{-8} \dots 10^{-7}$ ). Квадрупольная магнитная ловушка при транспортировке атомов преобразуется в специальную магнитную ловушку QUIC [10], имеющую ненулевое магнитное поле в минимуме магнитного потенциала ловушки. Это необходимо для подавления потерь атомов из-за эффекта Майораны. Облако атомов в этой ловушке приобретает сигарообразную форму, вытянутую вдоль оси  $y$ . Атомы рубидия в нашей ловушке QUIC имеют частоты колебаний в радиальных направлениях  $\nu_x = \nu_z = 255$  Гц

и в аксиальном направлении  $\nu_y = 12.6$  Гц. В ловушке QUIC осуществляется финальное охлаждение атомов рубидия с помощью электромагнитного высокочастотного испарения, достигается фазовая плотность  $\rho \gg 1$  и происходит бозе-эйнштейновская конденсация атомов рубидия.

На всех этапах охлаждения фазовая плотность атомов рубидия в ловушке детектируется с помощью резонансного лазерного излучения. Для этого измеряется размер облака атомов рубидия непосредственно в магнитной ловушке, кинетическая энергия разлетающихся атомов и количество атомов. Состояние атомов в ловушке и при их разлете анализируется с помощью модели невзаимодействующих бозонов. Когда фазовая плотность меньше критической, такая модель из-за малой плотности атомов рубидия в ловушке является достаточно точной для целей оптимизации экспериментальной процедуры.

Детектирование характеристик атомов в ловушке с помощью разлетающегося облака иллюстрирует рисунок [9]. Когда фазовая плотность атомов в ловушке меньше критической, облако разлетающихся атомов приобретает сферическую форму (см. рисунок, левая колонка). При достижении критической фазовой плотности возникают радикальные изменения характеристик облака атомов рубидия: 1) фазовая плотность облака атомов рубидия в магнитной ловушке резко возрастает; 2) в разлетающемся облаке атомов становятся видны две фракции, «изотропная» и «анизотропная»; 3) наблюдается инверсия формы «анизотропной» фракции при разлете (см. рисунок, правая колонка).

Перечисленные эффекты имеют ясную физическую интерпретацию. Когда фазовая плотность меньше критической, атомы распределены по многим колебательным уровням ловушки и после ее выключения разлетаются изотропно. Резкое возрастание фазовой плотности обусловлено бозе-конденсацией в низшем квантовом состоянии атомов в ловушке. Изотропная фракция содержит неконденсированные в ловушке атомы рубидия. Анизотропная фракция содержит конденсированные в ловушке атомы рубидия.

Свойства анизотропной фракции проще всего понять на примере ВЕС невзаимодействующих бозонов в анизотропной гармонической ловушке. ВЕС в такой системе приводит к накоплению макроскопического количества атомов в основном состоянии ловушки. Бозоны в основном состоянии сигарообразной ловушки имеют высокую радиальную локализацию и низкую аксиальную локализацию. Рас-

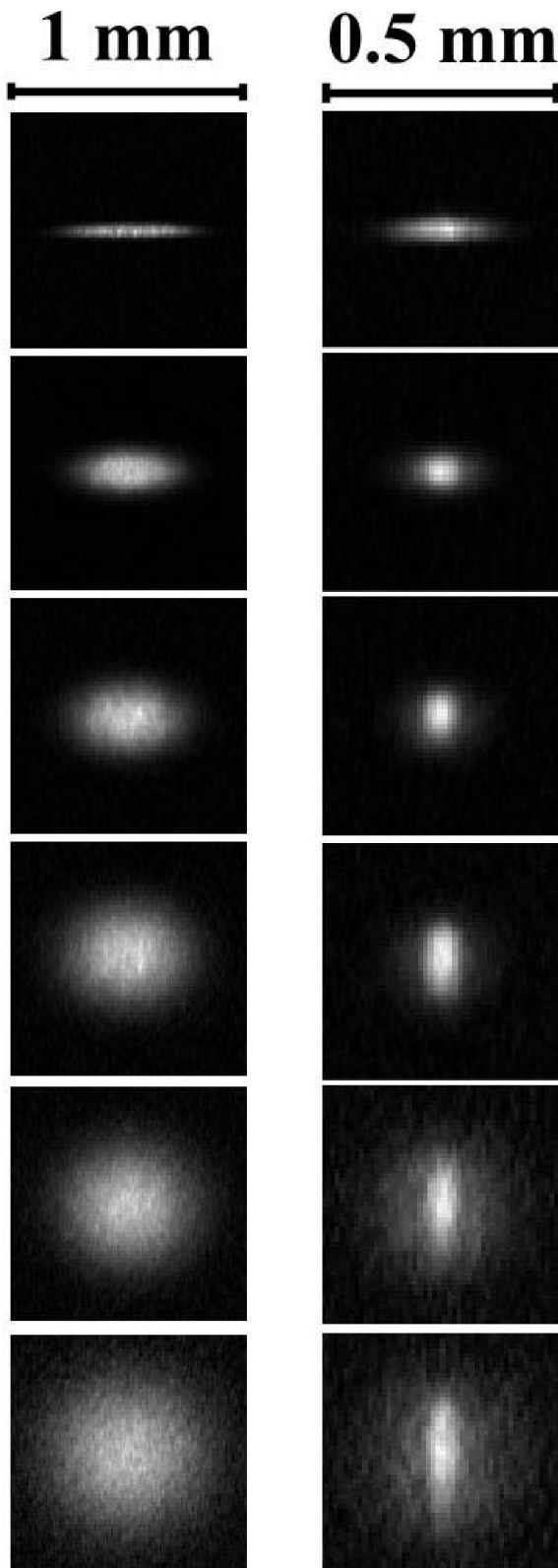


Рис. 1. Разлет атомов после выключения магнитной ловушки QUIC [9]. Левая колонка: атомы в ловушке имеют фазовую плотность меньше критической. Правая колонка: атомы в ловушке имеют фазовую плотность больше критической. Снимки сделаны с интервалом 5 мс

пределение по импульсам конденсированных бозонов имеет, согласно соотношению неопределенности, большую ширину в радиальном направлении и малую ширину в аксиальном направлении. После выключения ловушки форма облака атомов конденсата определяется импульсами атомов. Это приводит к превращению сигарообразного облака в тонкий диск с осью симметрии вдоль начального аксиального направления конденсата в ловушке.

Таким образом, в стандартной методике детектирование ВЕС осуществляется по факту достижения критической фазовой плотности бозонов в ловушке, а не по анизотропии разлета облака самого по себе, как полагают авторы работы [1]. Такую ошибку можно назвать логической. Действительно, существуют классические газы с анизотропным разлетом при расширении в вакуум, однако эти классические газы обладают низкой фазовой плотностью и не имеют отношения к бозе-конденсации. Отметим, что фазовая плотность газа в работе [1] не анализируется и даже не упоминается.

### 3. ОСЦИЛЛЯЦИИ ПЛОТНОСТИ

Работа [1] предсказывает существование нового физического эффекта — осцилляций плотности на границе расширяющегося в вакуум квантового газа. Для поиска этого эффекта в эксперименте понадобятся количественные оценки величины осцилляций плотности. Такие оценки в работе [1] не приводятся. Можно ожидать, однако, что эти осцилляции малы. Рассмотрим ВЕС невзаимодействующих между собой бозонов в анизотропной гармонической ловушке. Волновая функция такой системы вычисляется точно и совпадает с волновой функцией основного состояния трехмерного гармонического осциллятора [11]. Выключение ловушки приводит к анизотропному разлету облака бозонов без осцилляций [12]. Учет взаимодействия между конденсированными бозонами приводит к увеличению размеров конденсата в ловушке [11] и сглаживанию пространственных неоднородностей. Трудно ожидать больших осцилляций плотности и в такой системе.

Таким образом, отсутствие осцилляций плотности разлетающихся атомов рубидия в наших экспериментах [2, 9] логично объяснить малой величиной этого эффекта. На это указывает, в первую очередь, численный анализ разлета ВЕС на основе уравнения Гросса – Питаевского, проведенный в работе [2], в котором такие осцилляции не обнаружены. Осцилляции плотности не наблюдались и во всех других

известных нам экспериментах по разлету ВЕС. Наблюдение ВЕС непосредственно в ловушке [13] также не выявили осцилляций плотности.

#### 4. ВЫВОДЫ

В работе [1] предсказан новый физический эффект — осцилляции плотности на границе расширяющегося в вакуум бозе-конденсата. Такой эффект будет интересно обнаружить в будущем. Отметим, что в выполненных до сих пор экспериментах по ВЕС такие осцилляции плотности не обнаружены, по-видимому, из-за малой величины эффекта.

В работах [2, 9] сама постановка эксперимента и результаты измерений характеристик разлетающегося облака атомов рубидия свидетельствуют о достижении высокой фазовой плотности атомов в магнитной ловушке,  $\rho \gg 1$ . Из работ Эйнштейна [14, 15] известно, что ансамбли идентичных бозонов при фазовой плотности  $\rho \gg 1$  существуют в природе только в состоянии ВЕС.

Критерий Эйнштейна (1) является, по-видимому, необходимым и достаточным условием существования ВЕС разреженного газа. В соответствии с этим, технология создания ВЕС нацелена на достижение высокой фазовой плотности газа. Появление анизотропной фракции в разлетающемся облаке (наряду с другими особенностями) служит свидетельством достижения критической фазовой плотности. В стандартной диагностике ВЕС анизотропный разлет газа сам по себе (в отрыве от фазовой плотности газа) не считается доказательством достижения ВЕС. Эти обстоятельства убеждают нас в достоверности стандартной диагностики ВЕС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Кузнецов, М. Ю. Каган, ЖЭТФ **159**, 794 (2021) [E. A. Kuznetsov and M. Yu. Kagan, JETP **132**, 704 (2021)].
2. Ю. В. Лиханова, С. Б. Медведев, М. П. Федорук, П. Л. Чаповский, Письма в ЖЭТФ **103**, 452 (2016) [Yu. V. Likhanova, S. B. Medvedev, M. P. Fedoruk, and P. L. Chapovsky, JETP Lett. **103**, 403 (2016)].
3. K. M. O'Hara, S. L. Hemmer, M. E. Gehm, S. R. Granade, and J. E. Thomas, Science **298**, 2179 (2002).
4. E. Elliott, J. A. Joseph, and J. E. Thomas, Phys. Rev. Lett. **112**, 040405 (2014).
5. M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, Science **269**, 198 (1995).
6. C. C. Bradley, C. A. Sackett, J. J. Tollett, and R. G. Hulet, Phys. Rev. Lett. **75**, 1687 (1995).
7. K. B. Davis, M. O. Mewes, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, Phys. Rev. Lett. **75**, 3969 (1995).
8. Y. Castin, in *Bose-Einstein Condensates in Atomic Gases: Simple Theoretical Results, Coherent Atomic Matter Waves*, ed. by R. Kaiser, C. Westbrook, and F. David, Springer, Berlin, (2001), pp. 1–136.
9. П. Л. Чаповский, Письма в ЖЭТФ **95**, 148 (2012) [P. L. Chapovsky, JETP Lett. **95**, 132 (2012)].
10. T. Esslinger, I. Bloch, and T. W. Hansch, Phys. Rev. A. **58**, 2664 (1998).
11. F. Dalfovo, S. Giorgini, L. P. Pitaevskii, and S. Stringari, Rev. Mod. Phys. **71**, 463 (1999).
12. W. Ketterle, D. S. Durfee, and D. M. Stamper-Kurn, *Making, Probing and Understanding Bose – Einstein Condensates*, arXiv:cond-mat/9904034v2 (1999).
13. B. P. Anderson and M. A. Kasevich, Phys. Rev. A **59**, R938 (1999).
14. A. Einstein, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss., Phys. Math. Kl. **22**, 261 (1924).
15. A. Einstein, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss., Phys. Math. Kl. **23**, 3 (1925).