

Квантовые состояния разреженного бозе-газа, текущего по двумерному каналу

И. В. Шуняев,¹ А. А. Елистратов,² and Ю. Е. Лозовик^{3,4}

¹Московский педагогический государственный университет

²Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН

³Московский физико-технический институт

⁴Институт спектроскопии РАН

Бозе-конденсация атомов и квазичастиц, таких как экситоны и экситонные поляритоны, является одним из самых интересных явлений в современной физике из-за фундаментальной природы этого явления и огромных возможностей для прикладного применения^{1,2}. Одной из актуальных проблем является течение бозе-конденсата по низкоразмерным направляющим структурам, таким как каналы, оптические переключатели и так далее^{3,4}.

В данной работе исследованы квантовые состояния конденсата, текущего вдоль двумерной структуры. Найдено пространственное распределение плотности конденсата, спектр возбуждений, а также получено выражение для критической скорости конденсата.

Задача рассмотрена в приближении среднего поля, в рамках которого получено семейство аналитических решений уравнения Гросса-Питаевского:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + g n(x, t)\right)\Psi(x, t) = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi(x, t). \quad (1)$$

Найденные решения уравнения (1) описываются выражением:

$$n(x) = \gamma^- \operatorname{sn}^2\left(\sqrt{\frac{\gamma^+ mg}{\hbar^2}}x, \sqrt{\frac{\gamma^-}{\gamma^+}}\right), \quad (2)$$

где $\operatorname{sn}(u, k)$ - эллиптическая функция Якоби. γ^- и γ^+ - параметры, определяемые граничными условиями задачи и нормировкой на число частиц. Примеры пространственного распределения плотностей приведены на рис. 1.

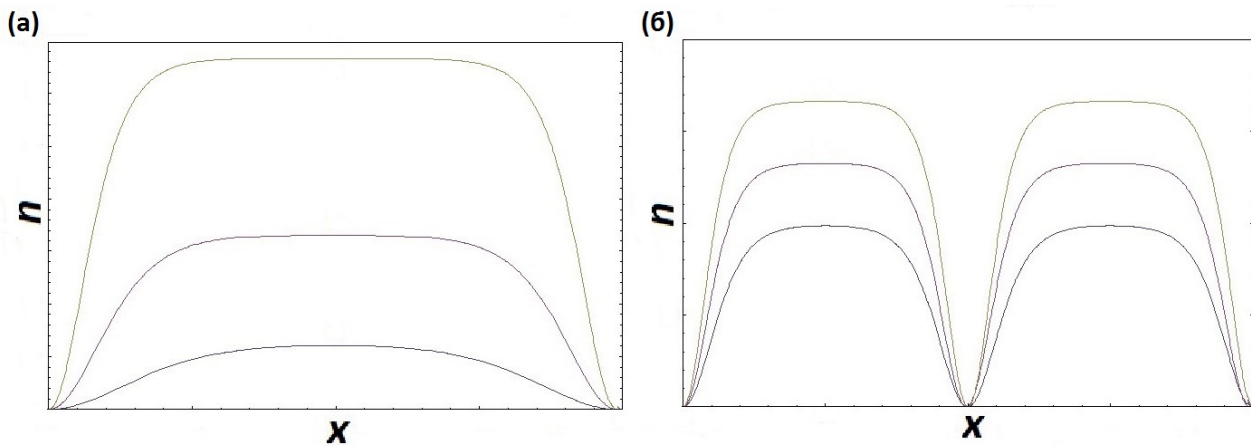


Рис. 1. Пространственное распределение плотности конденсата для номера решения $j = 1$ (а) и $j = 2$ (б) вдоль координаты x при различном числе частиц в системе. Плотность и координата приведены в безразмерных единицах.

Прослежен переход химического потенциала системы в одночастичную энергию в предельном случае отсутствия взаимодействия ($g = 0$), и переход выражения для связи между плотностью частиц и химическим потенциалом к стандартному выражению в приближении Томаса-Ферми $n = \frac{\mu}{g}$ в пределе сильного взаимодействия или большого числа частиц.

Получено выражение для спектра возбуждений в рассмотренной системе:

$$E = \sqrt{\left(\frac{\hbar^2 k'^2}{2m} - \mu' + 2g\gamma^- \right)^2 - (g\gamma^-)^2}, \quad (3)$$

где k - импульс возбуждения. Из-за сильно неоднородного распределения плотности конденсата спектр возбуждений обладает рядом особенностей, одной из которых является наличие в спектре щели между основным и первым возбужденным состояниями. Также прослежены предельные переходы выражения для спектра в пределах идеального бозе-газа и роста взаимодействия. При отсутствии взаимодействия выражение (3) превращается в спектр свободной частицы, а с ростом плотности или взаимодействия выражение (3) совпадает со спектром Боголюбова.

Наличие щели в спектре приводит к существенному увеличению критической скорости конденсата в канале шириной $L < \frac{\hbar\pi}{\sqrt{2m(2g\gamma^- - \mu)}}$ (см. рис 2). Критическая скорость может быть оценена по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{\hbar^2 \pi^2}{m^2 L^2} + \frac{2(2g\gamma^- - \mu)}{m}}. \quad (4)$$

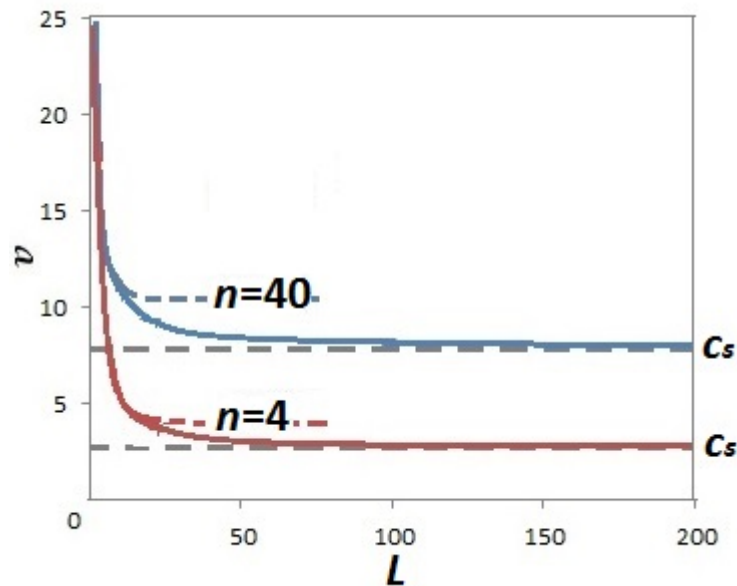


Рис. 2. Критическая скорость v как функция L для двух значений средней плотности конденсата. Сплошными линиями изображены результаты, полученные по формуле (4). Штрихованные прямые линии - скорость звука. Штрихованные кривые - результаты численного решения уравнений Боголюбова-де Жена. Плотность, ширина и скорость приведены в безразмерных единицах.

Литература

- ¹ Pitaevsky L., Stringari S. Bose-Einstein Condensation. – Oxford: Clarendon Press, 2003. – 382 p.
- ² Yu.E. Lozovik, A. G. Semenov. Theory of superfluidity in a polariton system. - Theoretical and Mathematical Physics. - 2008, - 154, No.2, 319–329.
- ³ I. Loutsenko and D. Roubtsov. Critical Velocities in Exciton Superfluidity. - Phys. Rev. Lett. - 1997. - 78, 3011.
- ⁴ C. Anton [et al.]. Operation speed of polariton condensate switches gated by excitons. - Phys. Rev. B. - 2014. - 89, 235312.