

На правах рукописи

Казинец Игорь Владимирович

**Эффекты взаимодействия лазерного
излучения с разреженными
ультрахолодными газами**

Специальность 01.04.02 - теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Санкт-Петербург

2003

Работа выполнена на кафедре “Теоретическая физика” в ГОУ ВПО
“Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет”

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент Чирков Александр
Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Картошкин Виктор
Арсеньевич

кандидат физико-математических наук
Борисенок Сергей
Владимирович

Ведущая организация: Российский институт
радионавигации и времени

Защита состоится 18 февраля 2004 года в 16-00 часов на за-
седании диссертационного совета Д212.229.05 в ГОУ ВПО “Санкт-
Петербургский государственный политехнический университет” по
адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, в ауди-
тории 265 II учебного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной биб-
лиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политех-
нический университет”.

Автореферат разослан 17 декабря 2003 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Титовец Ю.Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Развитие экспериментальной техники в области охлаждения ансамбля щелочноземельных атомов увенчалось в конце 20 века качественным прорывом. Были получены образцы с температурами в несколько нанокельвинов. Авторы этих работ были удостоены в 1997 году нобелевской премии. Подобные системы обладают нетривиальными свойствами, проявление которых при бóльших температурах либо невозможно, либо менее ярко. Речь идет о сложных когерентных эффектах и о эффектах связанных с нахождением атомного ансамбля в состоянии бозе-эйнштейновской конденсации (БЭК). Эксперименты по замедлению света в ультрахолодных газах, когда скорость света удалось уменьшить в миллионы раз, являются прекрасной демонстрацией нестандартного поведения подобных систем. А поскольку основными причинами замедления света в описанных выше экспериментах явились когерентное пленение населенностей (КПН) и бозе-эйнштейновская конденсация (БЭК), то представляется крайне перспективным исследование явлений, основанных на КПН и БЭК. Экспериментальное получение БЭК было отмечено нобелевской премией в 2001 году.

Цель работы — исследование распространения резонансного импульса в Λ -среде (рис. 1) с наведенной пространственно неоднородной когерентностью между нижними уровнями Λ -схемы; исследование явления самофокусировки двух спектральных составляющих лазерного излучения в подпороговом режиме когерентного пленения населенностей (КПН); исследование неустойчивости систем, находящихся в состоянии бозе-эйнштейновской конденсации, при взаимодействии с бихроматическим резонансным лазерным излучением; вывод аналитического выражения для структурного фактора однокомпонентного и двухкомпонентного конденсата

Бозе-Эйнштейна.

Новизна результатов, полученных в работе, заключается в том, что **впервые**:

- предсказан новый тип прозрачности в трехуровневой Λ -среде (рис. 1), возникающий при согласовании параметров падающего импульса с пространственной периодичностью первоначально наведенной когерентности среды;
- выведены уравнения описывающие самофокусировку бихроматического резонансного лазерного излучения в подпороговом режиме когерентного пленения населенностей, представлены результаты численного решения этих уравнений при одновременной фокусировке двух спектральных составляющих;
- предсказано развитие неустойчивости коллективных колебаний конденсата Бозе-Эйнштейна, вызванное распространением в конденсате двухмодового резонансного излучения;
- выведено аналитическое выражение для динамического структурного фактора как однокомпонентного, так и двухкомпонентного конденсата Бозе-Эйнштейна корректно учитывающее дискретные моды возбуждения конденсата.

Достоверность полученных результатов гарантируется корректным применением строго обоснованных методов теоретической и математической физики к описанию взаимодействие резонансного лазерного излучения со средой, находящейся как в газообразном состоянии, так и в состоянии конденсации Бозе-Эйнштейна.

Научная и практическая значимость. Результаты, изложенные в настоящей диссертационной работе, существенно развивают теорию таких физических явлений как “когерентное пленение

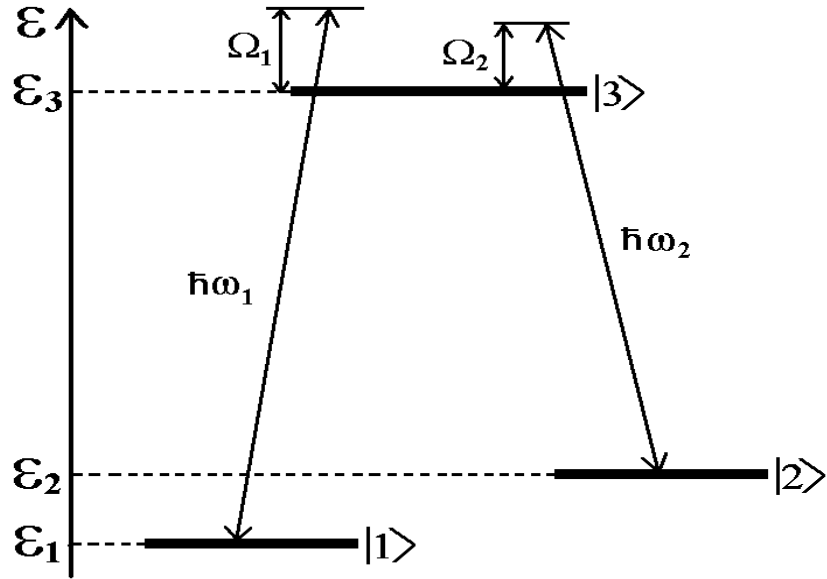


Рис. 1: Диаграмма энергетических уровней Λ -атомов среды.

населенностей” (КПН) и “бозе-эйнштейновская конденсация” (БЭК) в той части, которая касается взаимодействия резонансного света с разреженной газообразной средой, находящейся как в состоянии КПН, так и в состоянии БЭК. Практическая ценность нового типа прозрачности (“винтовой”) может заключаться в возможности создания на его основе устройства аналогичного “оптическому ключу”: импульс пройдет сквозь среду только если первоначальная когерентность среды соответствует параметрам падающего импульса. Самофокусировка лазерного излучения в подпороговом режиме КПН интересна с точки зрения уменьшения расходимости лазерного излучения, которое может наблюдаться при гораздо меньших интенсивностях излучения (на два порядка), чем в классическом случае. Нестабильность Бозе конденсата может быть использована в качестве источника когерентных материальных волн в устройстве называемом “атомным лазером”. Динамический структурный фактор Бозе конденсата важен с точки зрения изучения отклика конденсата при рассеянии на нем резонансного фотона с малым переданным

импульсом.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Новый тип прозрачности в Λ -среде с первоначально наведенной низкочастотной когерентностью.
2. Одновременная самофокусировка двух спектральных составляющих излучения в подпороговом режиме КПН.
3. Экспоненциальный рост коллективных колебаний БЭК при взаимодействии конденсата с резонансным бихроматическим лазерным излучением.
4. Аналитическое выражение для динамического структурного фактора однокомпонентного и двухкомпонентного конденсата Бозе-Эйнштейна учитывающее дискретные моды возбуждения конденсата.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Всероссийской научно-технической конференции “Фундаментальные исследования в технических университетах” в Санкт-Петербурге в 1997 и 1998 годах, на 6-й международной конференции по атомной и молекулярной физике (ЕСАМР VI) в городе Сиена в Италии в 1999 году, на международном семинаре по высоким технологиям “Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering” в Санкт-Петербурге в 1998 и в 1999 годах, на евроконференции по квантовой электронике (EQEC’98) в Глазго в Шотландии в 1998 году, на евроконференции по слабым столкновениям между манипулируемыми лазером системами (ESCOLAR’99) на острове Крит в Греции в 1999 году, на конференции по низким температурам (LT22) в Хельсинке в Финляндии в 1999 году, на научных семинарах кафедры теоретической физики СПбГПУ.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 статьях в научных журналах и в 11 тезисах конференций.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 159 страницах машинописного текста. Библиография содержит 106 печатных работ.

Структура диссертационной работы. Работа состоит из введения, трех глав и заключения.

Содержание работы

Во введении дается обоснование актуальности темы, формулируется цель и предмет исследования, излагается краткое содержание работы.

В первой главе изучена трехуровневая Λ -среда (рис. 1), находящаяся в состоянии “когерентного пленения населенностей” (КПН). Рассмотрено два нетривиальных явления в такой среде: 1) явление “винтовой” прозрачности, возникающая при распространении 2π -импульса в среде; и 2) явление самофокусировки, проявляющееся при непрерывном взаимодействии лазерного излучения со средой.

Следует подчеркнуть, что при рассмотрении этих явлений пренебрегается тепловым движением атомов, то есть наблюдение “винтовой” прозрачности и самофокусировки в подпороговом режиме КПН будет более ярким именно в ультрахолодном разреженном газе, где тепловое движение минимально и эффекты квантовой интерференции проявляются максимально.

Дан детальный анализ образования КПН в формализме когерентного взаимодействия (без учета релаксационных процессов). Разработана теория прозрачности Λ -среды нового типа (“винтовой”).

Установлены соотношения между пространственной структурой когерентности среды и параметрами падающего 2π -импульса необходимые для наблюдения “винтовой” прозрачности. Даны численные оценки данного явления. Установлено, что при “винтовой” прозрачности часть населенности системы переходит в возбужденное состояние, а часть — пленяется в суперпозиционном состоянии, созданном квантовой интерференцией. В зависимости от параметров падающего импульса и соответствующей этим параметрам пространственной структуре когерентности среды большая (или меньшая) часть населенности пленяется в суперпозиционном состоянии. И, соответственно, меньшая (или большая) часть населенности переходит в возбужденное состояние.

Кроме прозрачности среды происходит еще и преобразование частоты падающего импульса. На выходе из среды возможна либо полная конвертация частоты, либо более сложное преобразование падающего импульса в два импульса с несущими частотами равными частотам смежных оптических переходов в Λ -среде.

Рассмотрен формализм матрицы плотности для описания явления КПН. В рамках этого формализма приводится критерий возникновения КПН в Λ -среде с учетом релаксационных процессов. Подчеркивается, что для наблюдения явления КПН необходима интенсивность излучения превышающая некий порог. Указывается, что скорость распада пленяющего суперпозиционного состояния на несколько порядков (2–4 порядка) меньше скорости распада возбужденного состояния. Установлено, что в среде, находящейся в подпороговом режиме КПН (то есть когда интенсивность излучения чуть ниже порога КПН), возможно наблюдение нелинейности. Эта нелинейность проявляется при значительно меньших интенсивностях излучения, распространяющегося в среде, чем при распространении

излучения в обычной двухуровневой оптической среде. Проявлением этой нелинейности является эффект самофокусировки лазерного луча. Таким образом, в подпороговом режиме КПН возможно наблюдение самофокусировки излучения малой мощности. Приведены численные расчеты для случая одновременной фокусировки двух лучей (рис. 2). На основании численного решения анализируется процесс разрушения фокусировки двух лучей при увеличении разности отстроек.

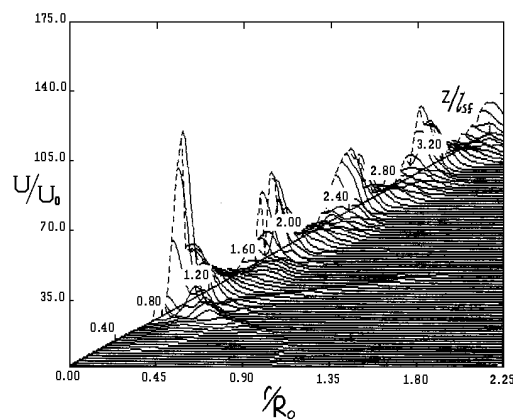


Рис. 2: Зависимость интенсивности U первого луча (в единицах первоначальной интенсивности U_0) от глубины z и радиуса r при одновременной фокусировке двух лучей в подпороговом режиме КПН

Во второй главе рассмотрена среда, находящаяся в состоянии конденсата Бозе-Эйнштейна. Достаточно детально представлен теоретический формализм, описывающий БЭК в разреженном газе.

Этот формализм базируется на вторичном квантовании системы N тождественных бозонов — квантовании по числам заполнения одночастичных состояний в эффективном потенциале, образованном из внешнего пленяющего потенциала и потенциальной энергии взаимодействия частицы с другими частицами находящимися в ловушке. Такой подход пренебрегает межчастичными корреляциями, что можно сделать для разреженных систем. Данное приближение

является приближением среднего поля (Хартри-Фока). Кроме приближения среднего поля используется приближение Боголюбова, заключающееся в замене операторов рождения и уничтожения бозона в основном состоянии эффективным потенциалом на числа. Приближение Боголюбова справедливо для систем, где населенность основного состояния высока ($N_0 \gg 1$), что имеет место в состоянии БЭК.

Для описания малых возмущений конденсата используется волновая функция, удовлетворяющая зависящему от времени уравнению Гросса-Питаевского (нелинейному уравнению Шредингера). Таким образом волновая функция конденсата описывает как сам конденсат, так и коллективные возмущения конденсата. Такой подход позволяет получить “гидродинамические уравнения” для плотности и скорости конденсата. Использование приближения Томаса-Ферми позволяет существенно упростить эти уравнения. Приближение Томаса-Ферми заключается в пренебрежении энергией “квантового давления” по сравнению с энергией межчастичного взаимодействия и энергией взаимодействия с пленяющим потенциалом. Это приближение справедливо при достаточно большом числе частиц конденсата ($N \gg a_{HO}/a$, где a — длина s -рассеяния атомов, a_{HO} — характерная длина ловушки)

Используя упомянутый выше теоретический формализм, описывающий БЭК, рассмотрено распространение бихроматического лазерного излучения в конденсате. Показано, что если интенсивность резонансного излучения линейно убывает в том направлении, в котором излучение распространяется, то вследствие обмена импульсом с полем происходит раскачка дипольных колебаний конденсата по экспоненциальному закону. Приведены численные оценки инкремента колебаний.

В третьей главе найдено аналитическое выражение для

динамического структурного фактора как однокомпонентного, так и двухкомпонентного конденсата, учитывающее дискретные моды возбуждения конденсата. Под двухкомпонентным конденсатом подразумевается атомная система в состоянии БЭК, состоящая либо из двух типов атомов, либо из атомов одного типа (например, ^{87}Rb), находящихся на различных сверхтонких подуровнях.

При передаче малого импульса отклик конденсата определяется дискретными уровнями коллективных колебаний конденсата. При рассеянии частицы на конденсате, конденсат получает импульс $\hbar\mathbf{q}$ и переходит из своего основного состояния, описываемого N -частичным вектором состояния $|0\rangle$, в возбужденное состояние, описываемое N -частичным вектором состояния $|f\rangle$, с энергией возбуждения $\hbar\omega_f$. Таким образом, динамический структурный фактор может быть записан в виде

$$\tilde{S}_f(\mathbf{q}) = \left| \left\langle f \left| \int d\mathbf{r} \hat{\psi}^\dagger(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{q}\mathbf{r}) \hat{\psi}(\mathbf{r}) \right| 0 \right\rangle \right|^2.$$

Здесь $\hat{\psi}(\mathbf{r})$ - полевой оператор, вводящийся в формализме вторичного квантования многочастичной системы (БЭК).

Использование приближения Боголюбова позволяет нам получить выражение для структурного фактора через коэффициенты u_f и v_f преобразования Боголюбова

$$\tilde{S}_f(\mathbf{q}) = N_0 \left| \int d\mathbf{r} \exp(i\mathbf{q}\mathbf{r}) [u_f^*(\mathbf{r}) - v_f^*(\mathbf{r})] \psi_0(\mathbf{r}) \right|^2,$$

где N_0 - число атомов в конденсате, ψ_0 - действительная функция, удовлетворяющая независящему от времени уравнению Гросса-Питаевского и нормированная на единицу.

В рамках гидродинамического подхода с использованием приближения Томаса-Ферми найдено выражение для возмущения плотности $\delta n_f(\mathbf{r}, t)$, соответствующего элементарному возбуждению конденсата с частотой ω_f .

Установлена связь между коэффициентами u_f и v_f и элементарным возмущением плотности $\delta n_f(\mathbf{r}, t)$.

В результате получено выражение для структурного фактора однокомпонентного конденсата:

$$\tilde{S}_{n,l}^{TF}(q) = \frac{2l+1}{2} \cdot \frac{a_{HO}}{a} \cdot \left(15N_0 \frac{a}{a_{HO}}\right)^{3/5} \cdot \sqrt{2n^2 + 2nl + 3n + l} \\ \times \frac{\left| \int_0^1 j_l(qR\bar{r}) F_{nl}(\bar{r}) \bar{r}^2 d\bar{r} \right|^2}{\sum_{k=0}^n \sum_{j=0}^n C_k^{(nl)} C_j^{(nl)} / (2k + 2j + 2l + 3)},$$

где a — длина рассеяния, a_{HO} — эффективная длина гармонической ловушки, $j_l(r) = \sqrt{\pi/(2r)} J_{l+\frac{1}{2}}(r)$ — сфер. ф-ция Бесселя, $F_{nl}(r) = \sum_{k=0}^n C_k^{(nl)} r^{l+2k}$, $C_k^{(nl)} = (-1)^k \prod_{k'=0}^{k-1} \frac{(n-k')(2n+3+2l+2k')}{(k'+1)(3+2l+2k')}$.

Данный результат, полученный для однокомпонентного конденсата, сравнивается с выражением, полученным с использованием квазиклассического приближения. В пределах области своей применимости квазиклассический результат дает завышенную оценку; однако оба выражения для структурного фактора равны нулю при тех же значениях переданного импульса $\hbar\mathbf{q}$ (Рис. 3).

Установлено, что полученное нами выражение для структурного фактора удовлетворяет правилу сумм. В то время как выражение, полученное с использованием квазиклассического приближения, правилу сумм не удовлетворяет.

Далее рассмотрено рассеяние фотона на двухкомпонентном конденсате. Причем считается, что фотон находится в резонансе с атомами первой компоненты и рассеивается только на них, в то время как с атомами второй компоненты не взаимодействует. Таким образом исследуется парциальный (рассеяние фотона только на атомах одной компоненты) структурный фактор.

Оказалось, что для двухкомпонентного конденсата зависи-

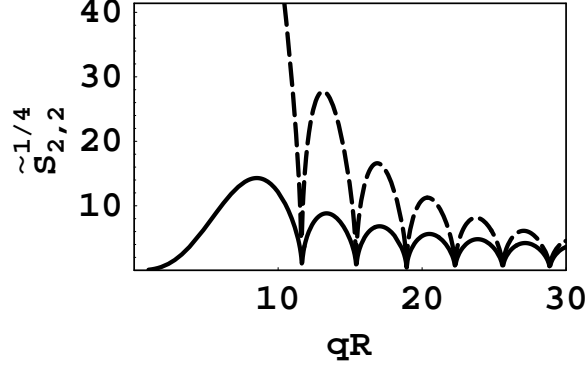


Рис. 3: Корень четвертой степени из динамического структурного фактора $\tilde{S}_{n,l}(q)$, как функция безразмерного параметра qR , где R - размер конденсата. $\tilde{S}_{n,l}(q)$ вычислен нами в приближении Томаса-Ферми (сплошная линия) и по квазиклассической формуле (штрихованная линия) для параметров: $N_0 = 10^7$ атомов, $\frac{a_{HO}}{a} \simeq 432$, $n = l = 2$

мость парциального структурного фактора от q такое же как и для однокомпонентного конденсата. Однако для двухкомпонентного конденсата происходит расщепление передаваемой при рассеянии энергии на две ветви, причем для каждой из этих ветвей структурный фактор домножается на коэффициент β^+ и β^- , соответственно:

$$S_{binary}^{TF}(\mathbf{q}, \omega) = \sum_{n,l} \tilde{S}_{n,l}^{TF}(q) [\beta^+ \delta(\omega - \omega_{nl}^+) + \beta^- \delta(\omega - \omega_{nl}^-)].$$

Важно заметить, что при определенной комбинации амплитуд рассеяния компонент, β^+ или β^- может быть больше единицы, выражая тем самым усиление рассеяния фотонов одной из компонент БЭК из-за наличия другой.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Предсказан новый тип прозрачности (“винтовой”) для резонансного двухкомпонентного лазерного излучения в трехуровневой Λ -среде, возникающий при согласовании параметров падающего импульса с пространственной структурой первоначально введенной низкочастотной когерентности среды;

2. Показано, что при “винтовой” прозрачности, происходит преобразование частотной составляющей падающего импульса — на входе в среду имеется импульс с частотой резонансной переходу $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$, а на выходе импульс либо с частотой перехода $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$, либо импульс с двумя частотными составляющими резонансными обоим оптическим переходам в Λ -среде;
3. Приведены численные оценки для “винтовой” прозрачности;
4. Предсказана возможность одновременной самофокусировки двух спектральных составляющих резонансного лазерного излучения в подпороговом режиме КПН при снижении порога фокусировки в $10^2 - 10^4$ раза по сравнению со случаем насыщения оптического перехода в двухуровневой системе;
5. Доказано, что при одновременной самофокусировке двух монохроматических лучей:
 - (а) фокусирующие свойства среды проявляются более ярко (в районе фокусов интенсивность в два и более раз выше, чем при фокусировке одного луча),
 - (б) имеется возможность изменения местоположения фокусов путем изменения интенсивностей и отстроек лучей,
 - (с) существует резкая зависимость пространственного распределения световой интенсивности от разности отстроек от резонанса двух лазерных полей.
6. Даны численные оценки для одновременной самофокусировки двух спектральных составляющих излучения в подпороговом режиме когерентного пленения населенностей.
7. Предсказано развитие неустойчивости колебаний конденсата

Бозе-Эйнштейна, находящегося под действием бихроматического лазерного излучения при определенных условиях;

8. Представлено аналитическое выражение для скорости конденсата в зависимости от переданного импульса, отстройке от резонанса, переданной энергии и массы атомов;
9. Приведены численные оценки инкремента колебаний конденсата Бозе-Эйнштейна при взаимодействии конденсата с резонансным бихроматическим лазерным излучением.
10. Найдено аналитическое выражение для динамического структурного фактора в приближении Томаса-Ферми для однокомпонентного и для двухкомпонентного конденсата Бозе-Эйнштейна;
11. Результат полученный для однокомпонентного конденсата сравнивается с выражением полученным в рамках квазиклассического приближения — в пределах области своей применимости квазиклассический результат дает завышенную оценку, однако оба выражения для структурного фактора равны нулю при тех же значениях переданного импульса;
12. Для двухкомпонентного конденсата, зависимость парциального (рассеяние фотона только на атомах одной компоненты) структурного фактора от переданного импульса не меняется, однако происходит расщепление передаваемой при рассеянии энергии на две ветви, причем для каждой из этих ветвей структурный фактор домножается на коэффициент β^+ и β^- , соответственно;
13. При определенной комбинации амплитуд рассеяния компонент возможно усиление рассеяния фотонов одной из компонент БЭК из-за наличия другой.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Казинец И. В., Матисов Б. Г., Мазец И. Е. Прозрачность винтового типа в трехуровневой среде. // *Письма в ЖЭТФ*.-1998,- Т.67.-№11.-С.874–880.
2. Kazinets I. V., Mazets I. E., Matisov B. G. Optical pulse probing of coherency gradient in λ -medium. // *Proc. SPIE*. -1999. -V.3687.- P.59–63.
3. Kazinets I. V., Mazets I. E., Matisov B. G. Optical screw-type transparency. // *Proc. SPIE*. -1999. -V.3736.-P.265–271.
4. Казинец И. В., Матисов Б. Г., Снегирев А. Ю. Одновременная самофокусировка двух лазерных лучей в подпороговом режиме когерентного пленения населенностей. // *ЖТФ*.-1997.-Т.67,- №7,-С.126–129.
5. Мазец И. Е., Матисов Б. Г., Казинец И. В. Взаимодействие оптически плотного бозе-конденсата с резонансным лазерным импульсом. // *Письма в ЖТФ*.-2000.-Т.26.-№6.-С.53–58.
6. Казинец И. В., Матисов Б. Г., Мазец И. Е. Структурный фактор двухкомпонентного конденсата Бозе-Эйнштейна. // *ЖТФ*.-2002.-Т.72.-№2.-С.28–35.