

Отзыв официального оппонента

Соколова Ивана Вадимовича

о диссертации Порозовой Виктории Михайловны

Когерентное взаимодействие света с одиночными атомами и атомными ансамблями в условиях квантового вырождения

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика

Круг вопросов, теоретически рассмотренных в диссертации, связан с оптическими свойствами ультрахолодных атомных ансамблей, приготовленных в состоянии конденсата Бозе-Эйнштейна (БЭК), и с методами предельного охлаждения одиночных атомов в лазерных оптических ловушках (оптический пинцет). Оба направления интенсивно развиваются в последние годы, имеются многочисленные теоретические предложения и впечатляющие экспериментальные демонстрации. Выяснение свойств БЭК на основе теории, исходящей из первых принципов, представляет фундаментальный интерес, а разработка методов охлаждения атомов в ловушках до основного колебательного состояния необходима для создания атомных кубитовых регистров в оптических решетках и реализации квантовых вычислений на их основе.

Таким образом, тематика диссертации является актуальной и практически важной.

Переходя конкретно к содержанию работы, следует отметить подробный и сделанный на высоком уровне обзор литературы (глава 1), как относящейся к решаемым в диссертации задачам, так и освещающей в более широком плане современное положение в данной области (например, роль сверхтекучести слабо неидеального БЭК в связи с долгоживущими макроскопическими квантовыми состояниями).

Глава 2 работы посвящена общей теории рассеяния фотона на БЭК в условиях, когда конденсат приготовлен с определенным пространственным профилем параметра порядка. Предполагается, что сам профиль удовлетворяет уравнению Гросса-Питаевского в присутствии слабого взаимодействия близко расположенных атомов (слабая неидеальность).

В работе впервые применено диаграммное представление теории возмущений для описания рассеяния одиночного фотона на слабо неидеальном конденсате Бозе-Эйнштейна. В присутствии электродипольного взаимодействия атомов с полем строятся диаграммные уравнения для связанных пропагаторов фотона и одиночного возбуждения среды (поляритона). При этом в описание закладываются такие реальные физические факторы, как зеэмановская структура возбужденных состояний атома и наличие поляризационных степеней свободы фотона.

Диаграммное представление динамики атомно-полевой системы позволило провести классификацию элементарных процессов, в которой разделены события рождения атомно-полевых поляритонов из конденсатного состояния с возвратом в это же состояние, и событий спонтанного излучения с рождением атомных состояний вне режима конденсата. Получено приближенное замкнутое решение связанных уравнений, возникающих из диаграмм, для чего применена перенормировка (регуляризация) с выделением и исключением формально бесконечных вкладов, таких как самовоздействие атомного диполя и лэмбовский сдвиг.

Исследование функций Грина атомно-полевого поляритона в однородном пределе позволило выделить и последовательно описать характеристики решений типа неподвижных атомных экситонов и быстрых (субсветовых) поляритонных волн. Автор прослеживает в полученных им решениях переход к пределу, в котором можно исключить события спонтанного излучения. При этом в качестве промежуточных состояний остается только конденсат и основным явлением становится сильное когерентное рассеяние на неоднородностях атомного ансамбля в состоянии ВЕС.

Применение общей теории к рассеянию на неоднородном в трех измерениях конденсате является трудной задачей. В главе 3 диссертации аналитически и численно анализируется одномерный предел, в котором БЭК представляется плоским слоем с заданным продольным распределением параметра порядка нескольких видов, и дается сравнение с рассеянием на классическом газе и с одномерным рассеянием на регулярной цепочке атомов, взаимодействующих с полем оптического волновода. Автор исследует упругий канал рассеяния - с сохранением частоты и поляризации света.

Найдено численным расчетом в рамках общей теории и в модели классического неупорядоченного газа той же плотности, что в отсутствие рассеяния Брэгга на периодической структуре спектры упругого пропускания и отражения вырожденного и невырожденного атомного газа различаются смещением спектрального профиля, которое определяется химическим потенциалом.

Интересной и наблюдавшейся в опыте особенностью БЭК является интерференция материальных волн, движущихся с различной скоростью, и формирование периодической структуры плотности. В диссертации рассмотрен случай ограниченной по длине структуры с шагом, равным половине длины волны света в разреженном газе, когда ярко выражены эффекты рассеяния Брэгга. Найдены отличия в спектрах пропускания и отражения вырожденного газа по сравнению с невырожденным газом и с регулярной одномерной цепочкой атомов, взаимодействующих с полем моды оптического волновода.

Для объяснения различий автор привлекает соображения о структуре запрещенных и разрешенных зон в спектре мод фотонного кристалла с линейной восприимчивостью, характерной для газа с невысокой плотностью, в условиях периодической модуляции восприимчивости. При перестройке частоты падающего фотона меняются условия интерференции волн встречных направлений и их согласование с шагом плотности -

отсюда автором выводятся особенности (осцилляции) в спектрах рассеяния на структурированном конденсате.

В Главе 4 работы разработано обобщение известного метода рамановского охлаждения колебаний атома в лазерной ловушке на случай одновременного охлаждения колебаний по всем трем координатам. Ловушка считается аксиально симметричной, что отвечает условиям типичного эксперимента.

Метод охлаждения по одной координате состоит в том, что в поле двух волн накачки осуществляется составной рамановский электрон-фононный переход, строго резонансный с процессом удаления одного кванта колебаний. Изменение состояния колебаний происходит в режиме Лэмба-Дике, когда импульс отдачи при рамановском переходе незначительно сдвигает волновую функцию колебания в пространстве импульсов. Для восстановления состояния электронной подсистемы предполагается оптическая накачка, когда в силу того же режима Лэмба-Дике колебательное квантовое число с большой вероятностью не меняется.

Автор впервые показал, что существует геометрическая и частотная конфигурация из четырех полей накачки (одно из которых участвует во всех рамановских процессах), такая, что все импульсы отдачи можно направить по осям x , y , z ловушки и воздействовать на соответствующие колебания. При этом подобраны поляризации волн, которые отвечают возбуждению в различных каналах ортогональных спиновых состояний, что важно для независимого воздействия на колебания по различным осям. Численное исследование динамики электрон-фононной системы показало, что предложенный механизм обеспечивает достаточное эффективное охлаждение, несмотря на некоторые отклонения от идеальной схемы. Отклонения связаны с наличием в зеэмановской структуре различающихся световых сдвигов в приложенных полях и с зависимостью рамановских матричных элементов от колебательных квантовых чисел.

Этот новый результат может получить практическое применение при реализации эффективных кубитовых регистров на нейтральных атомах в ловушках.

В качестве замечаний можно отметить следующее.

При построении связанных диаграмм теории возмущений в главе 2 автор не поясняет конкретно, какие промежуточные состояния атомов следует иметь в виду в неполном поляритонном пропагаторе во фрагментах, где учитывается спонтанный распад. Такое конструктивное пояснение было бы полезно для читателя.

В оценке пределов рамановского охлаждения в главе 4 для полноты было бы уместно также оценить влияние на колебательную подсистему завершающей части цикла, т. е. оптической накачки.

Имеются неизбежные погрешности оформления (например, не все гиперссылки ведут в нужное место).

Эти замечания не снижают высокую оценку новизны и значимости полученных

результаты в области современной квантовой теории ультрахолодных атомов и атомных ансамблей, имеющие фундаментальное и прикладное значение. Результаты этой работы несомненно будут применяться в исследованиях других научных групп.

Представленный материал является результатом большой аналитической и вычислительной работы, выполненной с применением современного теоретического аппарата. Корректное применение теории в рамках хорошо обоснованных приближений, а также сопоставление результатов с экспериментом и выводами других теоретических подходов (там, где это возможно) обеспечивают достоверность выносимых на защиту положений.

Автореферат и опубликованные статьи правильно и полно отражают содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа В. М. Порозовой **Когерентное взаимодействие света с одиночными атомами и атомными ансамблями в условиях квантового вырождения** отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Виктория Михайловна Порозова, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Соколов Иван Вадимович

доктор физико-математических наук, профессор физического факультета
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

Адрес: 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная 7/9

E-mail: i.sokolov@spbu.ru, sokolov.i.v@gmail.com

Телефон: +79516486654

Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей



И. В. Соколов