

# Действия обратной связи

**Новосибирские физики-теоретики изучают обратную связь в системах квантовой оптики. Поиск моделей, допускающих аналитическое решение, нужен для решения проблем квантовой теории управления.**

В теории управления квантовыми системами значительный интерес проявляется к управлению малоразмерными квантовыми системами (атомами, наночастицами, электронами в квантовой точке). Здесь действует так называемая квантовая обратная связь как эффективный инструмент управления квантовыми системами.

Модификация спектроскопических эффектов в системах с обратной связью является до конца не исследованной, но значимой для фундаментальной науки и приложений. Новосибирские специалисты попытались выяснить характер модификации и возможности использования систем обратной связи, основанной на квантовом измерении.

Для создания устройств квантовой оптомеханики важно знать, как организована система обратной связи, чтобы контролировать и охлаждать колебания когерентных атомарных ансамблей в ловушках и подвижных элементах. Различаются две группы подхода к организации управления квантовыми системами: обратная связь, основанная на измерениях (measurement-based feedback) и когерентная обратная связь (coherent feedback). Для понимания того, какой подход легче осуществить экспериментально, требуется обеспечить возможность взаимодействия между квантовыми системами. Кроме того, нужно учитывать управление динамикой атомарного конденсата Бозе-Эйнштейна и оптомеханических систем. Это возможно путем интерферометрических измерений. Но в таком случае возникает проблема: необходима быстрая перестройка формы потенциала оптической ловушки, удерживающей бозе-конденсат, а это представляет трудности в реальном эксперименте. Физики ищут альтернативное разрешение этой задачи.

Российские ученые из [Института автоматизации и электротехники](#) Сибирского отделения Российской Академии наук (ИАиЭ СО РАН) (г. Новосибирск) прежде, рассматривая явление квантовой обратной связи, провели теоретические исследования широкого круга эффектов нелинейной спектроскопии одиночных атомов, обусловленных системами обратной связи различного типа. Продолжение работы строится на использовании новой схемы с когерентной обратной связью.

Сотрудники Института – физики-теоретики **Леонид Вениаминович Ильичев** – доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник ИАиЭ СО РАН, профессор кафедры квантовой оптики физического факультета Новосибирского государственного университета (г. Новосибирск) и **Владимир Александрович Томилин** – кандидат физ.-мат. наук, младший научный сотрудник ИАиЭ СО РАН, старший преподаватель кафедры квантовой оптики физического факультета Новосибирского государственного университета (г. Новосибирск) – рассказали, каковы потенциальные возможности квантовой обратной связи и что составило идею их авторского подхода к описанию и анализу схем с обратной связью.

Прежде всего, *профессор Леонид Ильичев* помог разобраться, что представляет собой квантовая обратная связь:

«Галант Станислава Лема развернул в его «Сумме технологии» завораживающие перспективы кибернетики. Проходящие десятилетия только усиливают впечатления от идей Лема. Если ориентироваться на известное определение Кауфмана кибернетики как науки о системах и процессах, взаимодействующих самих с собой и воспроизводящих себя, становится понятным роль обратной связи в кибернетике. Лем в «Сумме технологии» много писал о гомеостатах, функционирующих и сохраняющих свою структуру от деструктивного воздействия окружения посредством обратной связи. Эволюция даже простейших классических систем, получивших возможность контролировать себя благодаря обратной связи, начинает демонстрировать неожиданные свойства. Тем более оснований ожидать интересных результатов от квантовых систем с обратной связью».

**Главный научный сотрудник ИАиЭ СО РАН пояснил,** каков источник возникновения обратной связи, её фундаментальная роль и какие существуют варианты обратной связи:

«Квантовая система может быть открытой, т.е. обменивающейся информацией с окружением, или замкнутой, когда такой обмен пренебрежимо мал. С этим различием связаны два типа квантовой обратной связи – когерентной и основанной на измерениях. Сначала о втором типе, предполагающем открытость квантовой системы. Её информационный (и, как следствие, энергетический) контакт с внешним миром обычно состоит из хорошо локализованных во времени событий. Примером могут служить регистрируемые системой детекторов события спонтанных испусканий фотонов атомом, непрерывно возбуждаемым лазерным источником. Принципиальной является абсолютная случайность регистрации испущенного атомом фотона в данный конкретный момент времени.

Система детекторов непрерывно наблюдает (измеряет) фотонное поле в окрестности атома и конкретный результат – регистрация спонтанного фотона или её отсутствие – не предопределено никаким параметром в Природе. Система (в данном случае – атом) оказывается генератором последовательности событий испусканий-регистраций. Если создать устройство, которое после каждой регистрации преобразует некоторым заданным способом состояние системы или закон её эволюции, получится петля обратной связи, основанной на измерениях. Система начинает управлять собой посредством генерируемых ей событий. Имманентная случайность регистрации спонтанного фотона есть одна из форм известной в квантовой физике проблемы измерения. Получается, что такая обратная связь эксплуатирует фундаментальное свойство квантового мира, не получившее до сего времени общепринятой интерпретации. Это обстоятельство заставляет приготовиться к встрече с самыми неожиданными эффектами квантовой обратной связи.



**Леонид Вениаминович Ильичев** – физик-теоретик, доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник ИАиЭ СО РАН, профессор кафедры квантовой оптики физического факультета Новосибирского государственного университета

– *Ильичев продолжил рассуждение* – Не менее интересна когерентная обратная связь. Предположим, что состояние некоторой квантовой системы можно контролировать с помощью пучка зондирующего излучения. Пучок приготовлен на входе системы, а на выходе в своей структуре он уже несёт информацию о контролируемой системе. Если теперь часть пучка на выходе с помощью полупрозрачного зеркала направить на вход, квантовая система будет зондироваться пучком, уже изначально содержащем «отпечаток» её состояния. Образуется петля когерентной обратной связи. Возможна некоторая ассоциация с взаимным бесконечным отражением пары зеркал. Процедура зондирования неизбежно модифицирует состояния системы. Когерентная обратная связь усиливает и видоизменяет этот процесс».

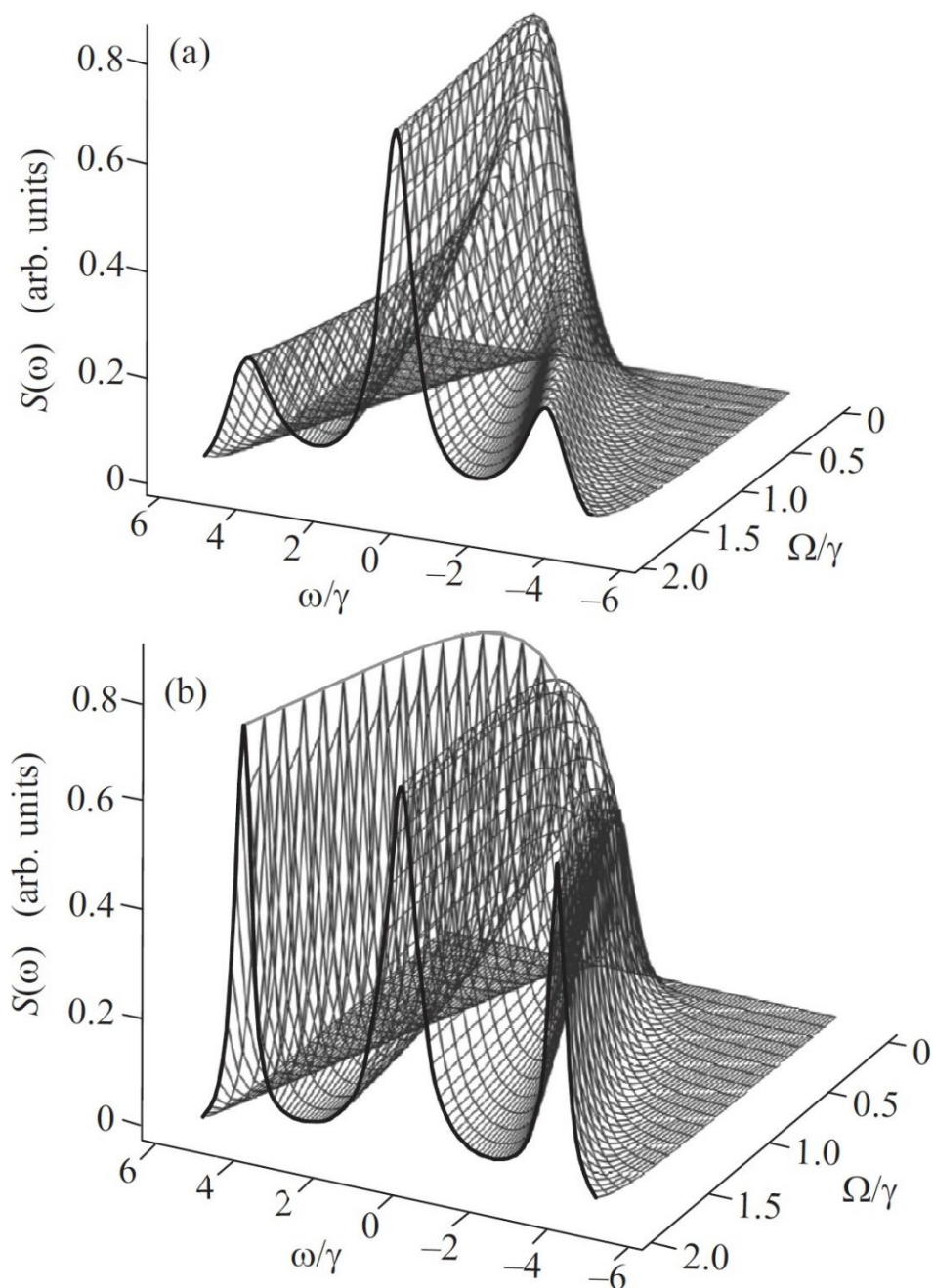


Рисунок 1. Представлен триплет Раутиана-Моллоу для спектра резонансной флуоресценции атома. Вверху а) без обратной связи, внизу б) с обратной связью.

В своих работах, *по словам Ильичева*, они показали, что «естественный вариант когерентной обратной связи возникает при взаимодействии потенциально многих атомов с излучением, находящемся в так называемом состоянии «кошки Шредингера». При этом

один атом при своём возбуждении переключает амплитуду «кошки Шредингера» и меняет условия для всех остальных атомов».

Новосибирскими физиками в предыдущем проекте по гранту РФФИ «Спектроскопия отдельных атомов в цепи квантовой обратной связи» (2012-2017) был предложен свой подход к описанию обратной связи.

**Леонид Ильичев пояснил**, какой теоретический аспект был изучен детально:

«Как уже говорилось, обратная связь, основанная на измерениях, может инициировать резкую модификацию состояния квантовой системы или модификацию законов её динамики. Первый вариант был предложен и исследован профессором Говардом Вайсманом из Центра квантовой динамики университета г. Брисбена в Австралии. Мы изучали вторую возможность – в простейшем случае предполагали переключение знака амплитуды поля внешнего источника, задающего эволюцию системы, при каждом её испускании спонтанного фотона.

Эволюция при самоконтроле системы меняется радикальным и неожиданным образом. Поэтому при исследовании квантовой обратной связи возникает несколько необычная для теоретической физики ситуация, когда ценность представляет поиск эффектов с расчётом на удачу. Например, первый результат касался модификации спектра резонансной флуоресценции атома. Оказалось, что хорошо известная трёхкомпонентная структура Раутиана-Моллоу становится благодаря обратной связи резкой, асимметричной и удивительно устойчивой. Она остаётся чёткой даже при малой интенсивности внешнего излучения, когда без обратной связи уже нет никаких следов от боковых компонент. Это даёт перспективу нетрадиционным способам контроля частоты излучения в нелинейной лазерной спектроскопии».

Кроме того, ученые рассмотрели разные модели отдельных атомов, например, исследовали резонансную флуоресценцию одиночного двухуровневого атома в цепи обратной связи. Однако с увеличением числа уровней атомов задача усложняется. **По замечанию Ильичева**, «есть работы и результаты об эффектах обратной связи в системе атома с тремя уровнями в виде  $\Lambda$ -схемы с двумя основными уровнями и одним возбуждённым. При этом комбинируются эффект обратной связи и так называемый эффект когерентного пленения населённостей. Возникают неожиданные и красивые явления. В перспективе они найдут применения, например, в стандартах частоты, где используется явление когерентного пленения населённостей».

Итоги проведенной работы не только представлены научными публикациями в рецензируемых журналах (*«Optics Communications»*, *«Annalen der Physik»*, *«Physical Review A»*), но заложили основу для продолжения исследований в рамках следующего проекта. Так, с профессором Ильичёвым активно сотрудничал начинающий исследователь, тогда ещё студент Новосибирского государственного университета, Владимир Томилин.

Теперь молодой ученый, защитивший в конце прошлого года кандидатскую диссертацию по вопросам квантовой обратной связи, получил грант РФФИ по авторскому проекту **«Когерентная интерферометрическая обратная связь в задаче управления атомарным конденсатом Бозе-Эйнштейна»**. Эта работа, рассчитанная на 2 года (с 2018-го по 2020-й), посвящена анализу теоретической модели другого порядка и поиску методики изучения динамики оптомеханических систем и атомарного конденсата Бозе-Эйнштейна с применением обратной связи.

«В настоящее время Владимир Томилин занимается исследованием оригинальной схемы эффективного управления атомарным конденсатом Бозе-Эйнштейна как протяжённой квантовой системы с помощью интерферометрической схемы с участием когерентной

обратной связи. Ранее мы предложили похожую схему с обратной связью на основе измерений. Она показала свою эффективность, но требовала перестройки формы потенциала, удерживающего конденсат. Есть надежда устранить эту необходимость в новой схеме», – *комментирует профессор Леонид Ильичев.*

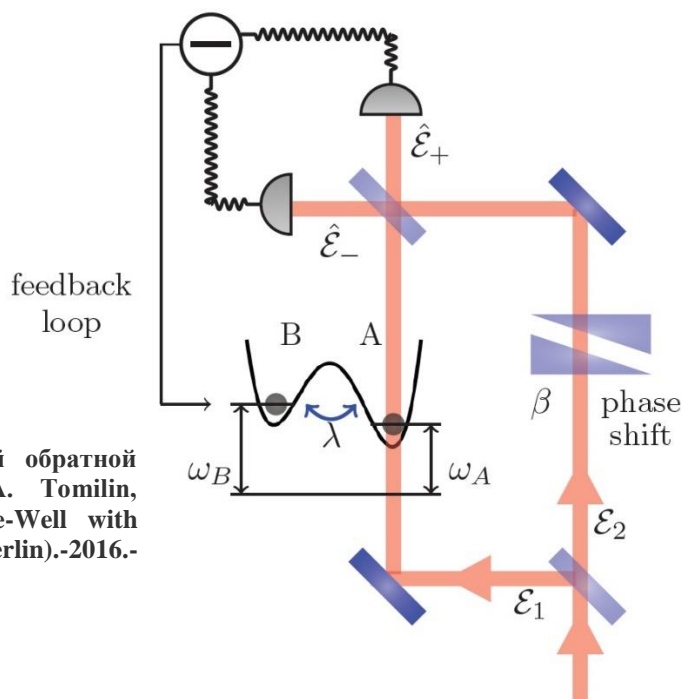
**Руководитель и автор проекта Владимир Томили** *объяснил*, в чем принципиальное отличие этого исследования. Опираясь на подход, основанный на интерферометрических измерениях, который прежде уже рассматривался в 2016 году (V.A. Tomilin, L.V. Il'ichov, «BEC Dynamics in a Double-Well with Interferometric Feedback» - *Ann. Phys. (Berlin)*.-2016.-V.528-issue.7-8.-pp.619-625.), в данном случае предлагается другая схемы с когерентной обратной связью.

**Как отмечает Томили**н, разница в том, что в прошлой работе «рассматривался конденсат Бозе-Эйнштейна, локализованный в двухъямном оптическом потенциале в плече обычного интерферометра Маха-Цандера, причем зондированию подвергалась только одна из ям. Выходное излучение интерферометра регистрировалось, и в зависимости от того, в каком из выходных каналов был зарегистрирован фотон, при помощи цепи обратной связи происходило переключение оптического потенциала, удерживающего конденсат, в одну из двух заранее заданных конфигураций (Рисунок 2).



**Владимир Александрович Томили**н – физик-теоретик, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник ИАиЭ СО РАН, старший преподаватель кафедры квантовой оптики физического факультета Новосибирского государственного университета

Проблемы такой схемы проистекают из самой необходимости переключения оптического потенциала. Их нужно осуществлять, с одной стороны, достаточно быстро (чтобы можно было пренебречь эффектами запаздывания), а с другой – не слишком быстро, чтобы не допустить возбуждения колебательных уровней энергии в потенциале».



**Рисунок 2.** Схема интерферометрической обратной связи, основанной на измерениях (V.A. Tomilin, L.V. Il'ichov, «BEC Dynamics in a Double-Well with Interferometric Feedback» - *Ann. Phys. (Berlin)*.-2016.-V.528-issue.7-8.-pp.619-625)

В новой схеме, как подчеркивает новосибирский физик, есть два принципиальных отличия: «Во-первых, в ней происходят переключения не потенциала, а параметров оптического элемента, создающего фазовый сдвиг в свободном от конденсата плече интерферометра (Рисунок 3). Их варьирование технически куда проще осуществить, что является очевидным преимуществом предлагаемой схемы. Второе важное отличие – это добавление цепи когерентной обратной связи, что, как ожидается, позволит усилить эффект от переключений фазовых сдвигов в плане управления конденсатом».

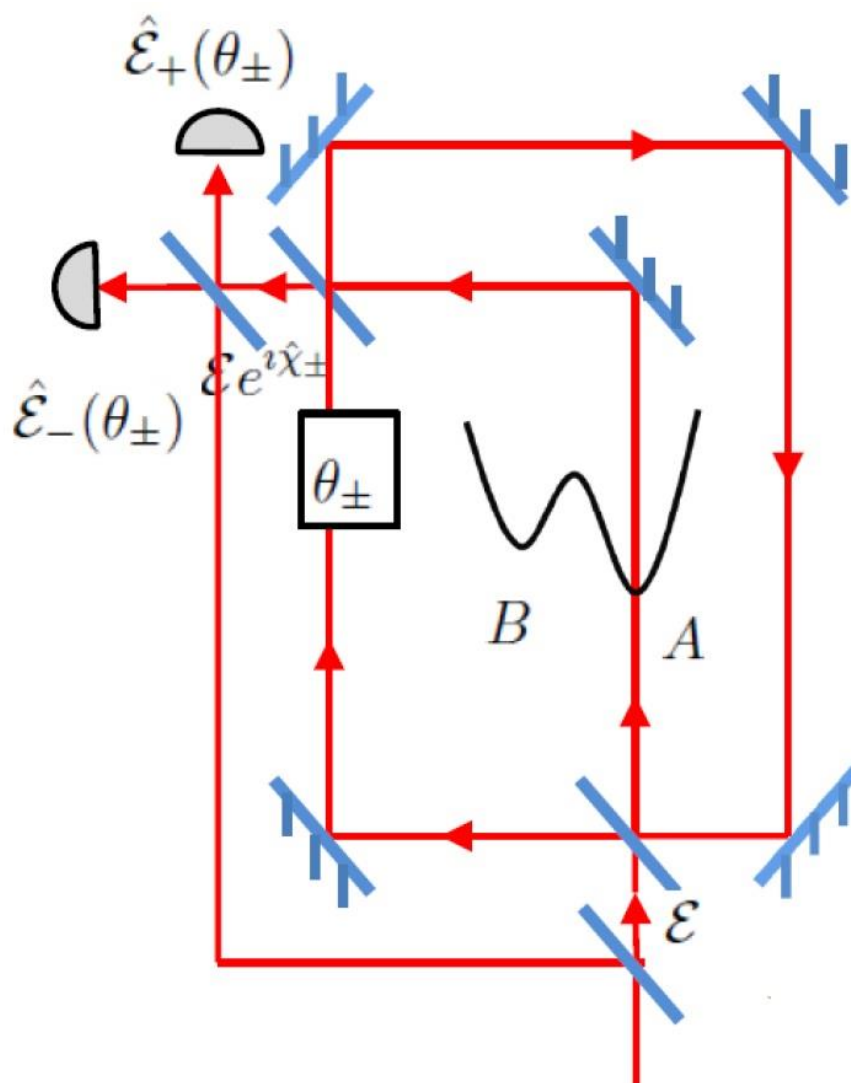


Рисунок 3. Схема когерентной интерферометрической обратной связи, усиленной измерениями.

*Какие предполагается рассмотреть эффекты обратной связи?*

«Мы планировали рассмотреть два случая – когда зондирующее поле является классическим, и когда оно рассматривается квантово-механическим образом. В первом случае ожидаемые эффекты обратной связи – это управление состоянием бозе-конденсата, а именно – увеличение времени существования когерентности квантового состояния и управлением пространственным распределением атомов в оптическом потенциале. Эта часть программы Проекта в основном уже завершена. В случае квантованного поля ожидается получение экзотических запутанных состояний поля и конденсата – эти вопросы будут рассмотрены в дальнейших исследованиях», – **ответил Владимир Томилин.**

Так, в рамках настоящего научного исследования осуществлены следующие намеченные шаги. Как сообщил молодой ученый, «для начала была рассмотрена задача с многопетлевой

когерентной обратной связью, когда конденсат локализован лишь в одной яме и зондируется классическим полем (Рисунок 4). Было исследовано влияние числа петель обратной связи, а также значений контролируемых фазовых сдвигов, на процесс декогеренции атомного статистического оператора. Показана возможность эффективного управления скоростями декогеренции различных матричных элементов. В частности, фоковские состояния, без обратной связи подверженные наиболее сильной декогеренции, при включении обратной связи с несколькими петлями имеют на порядки более низкую скорость декогеренции.

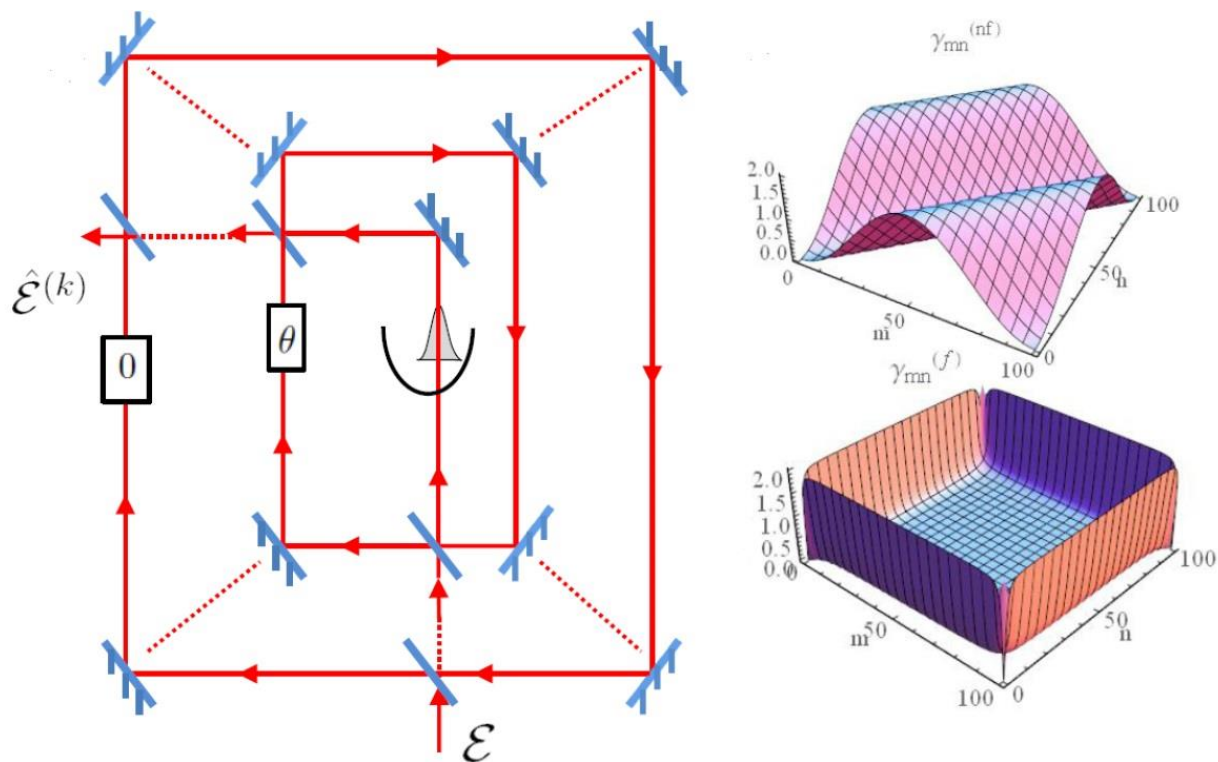


Рисунок 4. Схема многопетлевой когерентной обратной связи и скорости декогеренции элементов матрицы плотности в базисе Фока без обратной связи (вверху) и в ее присутствии (внизу).

Однако, как оказалось, одна лишь когерентная обратная связь указанного типа не в состоянии влиять на пространственное распределение атомов конденсата в потенциале. Поэтому была рассмотрена модифицированная схема, включающая в себя также и обратную связь, основанную на измерениях, управляющую фазовым сдвигом в свободном плече интерферометра (Рисунок 3)».

«Первые результаты решения этой задачи были получены лишь недавно, но они уже позволяют утверждать, что изменение указанных сдвигов дает возможность эффективного управления распределениями атомов по ямам», – **подчеркнул Томилин.**

**Как сообщил молодой ученый,** эти новые результаты в рамках проекта были представлены недавно (**11 ноября 2019г.**, Москва, Фонд развития интернет-инициатив) на Отчетной конференции по конкурсу проектов фундаментальных научных исследований, выполняемых молодыми учеными, проводимому совместно РФФИ и Фондом «Национальное интеллектуальное развитие».

Кроме того, **как отметил Владимир Томилин,** «в качестве предварительных исследований перед переходом к случаю квантованного зондирующего поля, было признано целесообразным рассмотреть задачу о статистике фотоиспусканий квантованной моды в неидеальном резонаторе, с накачкой в виде источника сжатого света. Действие обратной связи инициировалось детектированием покинувших резонатор фотонов и заключалось в переключении фазы поля в резонаторе на величину  $\pi$  (Рисунок 5).

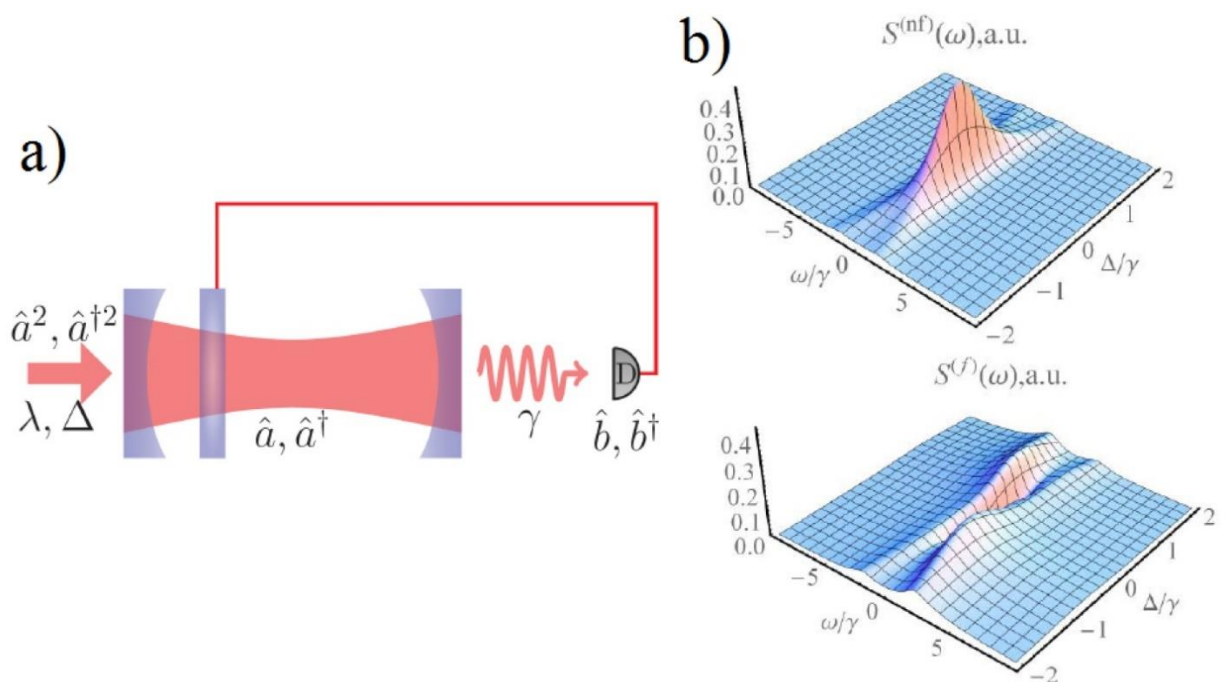


Рисунок 5. (а) Схема управления квантованной модой в резонаторе при помощи  $\pi$ -переключений фазы и источника сжатого света. (б) Спектр моды поля без обратной связи (вверху) и в ее присутствии (внизу)

Прелестью данной задачи является возможность ее точного аналитического решения, что является большой редкостью в теории квантовой обратной связи. В частности, было исследовано влияние обратной связи на спектр излучения полевой мод. В отличие от случая без обратной связи, в ее присутствии спектр приобретает явную асимметрию, а его двухкомпонентная структура становится намного более выраженной».

Данные результаты были апробированы на *Международной конференции ICQT 2019 (15-19 июля 2019г., Москва)* в форме стендового доклада V.A. Tomilin, L.V. Pichov "Solvable model of phase-switching quantum feedback". Также готовится к публикации статья в журнале *Journal of Physics A: Mathematical & Theoretical*.

Таким образом, обозначенная линия исследования—детальный анализ теоретический модели фазово-контрастного зондирования атомарного конденсата Бозе-Эйнштейна с применением когерентной обратной связи—находится в стадии активной разработки теоретического аппарата.

В конечном итоге, специалистам предстоит подтвердить свои предположения, ориентируясь на алгоритм выбранной модели, и убедиться в эффективности произведенных вычислений.

#### Источники:

- [Действия обратной связи](#) – Научная Россия (scientificrussia.ru), Москва, 27 ноября 2019.  
[Действия обратной связи](#) – 1k.com.ua, Симферополь, 27 ноября 2019.