

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н.
ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 535.1

Федоров Илья Алексеевич

**НЕЛОКАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
КВАНТОВЫМ СОСТОЯНИЕМ СВЕТА**

Специальность — 01.04.05
ОПТИКА

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2016

Работа выполнена в Отделении оптики ФИАН и лаборатории квантовой оптики Международного Центра Квантовых Технологий “Российский Квантовый Центр”.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Львовский Александр Исаевич (ФИАН)

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Масалов Анатолий Викторович (ФИАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Моисеев Сергей Андреевич
(Казанский квантовый центр, КНИТУ-КАИ)

кандидат физико-математических наук,
Катамадзе Константин Григорьевич
(Лаборатория физики квантовых компьютеров,
ФТИ РАН)

Ведущая организация: Институт спектроскопии РАН

Защита диссертации состоится “___” _____ 2016 года в _____ часов на заседании совета Д002.023.03 при ФИАН по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, с авторефератом – на сайте института www.lebedev.ru

Автореферат разослан “___” _____ 2016 года.

Отзывы на автореферат просим присылать по адресу: 119991 ГСП-1 г. Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН, Отделение Оптики.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук

профессор Казарян М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Данное исследование посвящено решению задач управления квантовым состоянием объекта по данным измерений в другом объекте, находящимся в перепутанном состоянии с первым. Разобщенность объектов в пространстве обеспечивает *нелокальный* характер управления. Рассмотрены случаи, когда измерения над управляющим объектом имеют частичный характер и не приводят к разрушению квантового состояния. В качестве объектов управления служат световые пучки.

Актуальность работы

Задача об управлении квантовым состоянием света является ключевой для развития квантово-оптических технологий. Последние составляют необходимый ингредиент квантовых технологий в целом, так как квант света — фотон — является единственной элементарной частицей, способной сохранять своё квантовое состояние, преодолевая большие расстояния — то есть, выполнять функцию носителя квантовой информации [1].

Непосредственное управление квантовым состоянием света требует наличия среды, обладающей значительными нелинейными свойствами на однофотонном уровне интенсивности [2]. Низкая эффективность этих методов есть следствие переноса квантовой информации в атомные степени свободы и обратно; в результате, наследуется чувствительность атомной системы к шумам окружения. Помимо этого, приготовление экзотических систем, обладающих требуемыми нелинейными свойствами, само по себе является сложнейшей экспериментальной задачей [3, 4].

Эффективным подходом к управлению квантовым состоянием света является использование нелокального взаимодействия запутанных физических систем. Этот подход предполагает запутывание целевой моды света со вспомогательной модой, после чего проективное измерение в последней индуцирует необходимую операцию в целевой моде. Наиболее распространённым является проектирование вспомогательной моды на фоковское или квадратурное состояние, осуществляемое с помощью отбора состояний по результатам однофотонного или гомодинного детектирования — сравнительно простых измерительных процедур.

В настоящее время, метод нелокальной проекции лежит в основе многих протоколов приготовления квантовых состояний света; именно этот пер-

вый этап является ключевым ноу-хау многих квантово-оптических технологий. Из элементарной базы легко доступных сжатых состояний света, методы нелокальной инженерии сегодня позволяют получать фоковские [5, 6], суперпозиции когерентных состояний, известные под именем Шрёдингеровской кошки [7–10], а также их производные: делокализованные N -фотонные пакеты [11, 12], гибридные состояния [13, 14], и многие другие.

Квантовые состояния света чрезвычайно чувствительны к потерям; этим объясняется малочисленность реально используемых квантовых технологий. Концентрированию квантовых свойств, или *дистилляции* запутанности состояний света, служит особый класс нелокальных методов манипуляции. Эффективной техникой дистилляции является операция вычитания одиночного фотона; применённая двумодовому состоянию света, она позволяет получить состояние с более сильной запутанностью [15, 16]. Недостатком существующих методов является малость коэффициента усиления запутанности. Разработка более эффективного протокола дистилляции имеет важнейшее значение для таких разделов квантовых технологий, как криптография [17, 18], метрология [12, 19] и вычисления [20, 21].

Накопление методов приготовления и элементарной обработки квантовых состояний света открывает возможности создания более сложных машин для передачи и обработки квантовой информации. Конечной целью — как прямой, так и косвенной, указывающей на полноту возможностей квантовых технологий — является создание квантового компьютера — машины, решающей вычислительные задачи, обрабатывая информацию в форме состояний квантовых систем [20–23]. Сборка подобных схем требует точной юстировки участвующих строительных блоков; с этим связана постановка задачи о характеристике неизвестного квантового процесса как *чёрного ящика* [24]. Многие важнейшие квантовые процессы — интерферометры, логические элементы, нелокальные операции — являются существенно многомодовыми, и не могут быть полностью и эффективно характеризованы с помощью существующих методов [25–27]. Разработка удобного метода её решения является необходимым условием постройки сложных квантовых машин.

Цели и задачи исследования

Цели:

1. Изучение возможностей процедуры уничтожения фотона для реализации нелокальных операций над запутанным квантовым состоянием света. **Задачи:**

- создать теоретическое описание эффекта, разработать экспериментальную схему.
- построить экспериментальную установку, позволяющую синтезировать и характеризовать фоковские состояния света с эффективностью более 50%.
- разработать и построить модуль, реализующий операцию уничтожения фотона в части распределённого состояния света.
- применить операцию уничтожения фотона к части распределённого фоковского состояния для различных чисел фотонов. Проанализировать результаты томографической реконструкции результирующих состояний.

2. Разработка метода дистилляции квантовой запутанности с помощью бесшумового усиления света. **Задачи:**

- разработать схему и провести моделирование эксперимента, определить основные параметры: допустимые уровни запутанности исходного состояния и оптических потерь, требуемую величину коэффициента усиления.
- построить экспериментальную установку, позволяющую синтезировать и характеризовать двумодовое состояние света Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР).
- построить модуль, осуществляющий бесшумовое усиление света. Синтезировать однофотонное состояние света с эффективностью $\approx 55\%$.
- разработать технику определения фазы дистиллированного состояния.
- осуществить серию экспериментов и томографию дистиллированного состояния при различных уровнях потерь и коэффициентов усиления. Провести анализ результатов.

3. Разработка метода характеристики неизвестного многомодового квантового процесса. **Задачи:**

- разработать и построить экспериментальную схему.
- разработать методику проведения томографически-полного набора гомотинных измерений в выходных каналах процесса.
- реализовать численный алгоритм Максимального правдоподобия для реконструкции тензора двумодового процесса и осуществить отладку на симулированных данных.
- провести необходимый набор измерений, реконструировать тензор процесса, определить и характеризовать источники ошибок.

В качестве основных положений на защиту выносятся:

1. Уничтожение фотона в части светового пучка имеет нелокальное действие на квантовое состояние света. При осуществлении такой операции в одной из поляризационных компонент диагонально-поляризованного фоковского состояния света, энергия ортогонально-поляризованной компоненты состояния уменьшается на половину энергии фотона.
2. Разработан метод вероятностного повышения уровня квантовых корреляций слабо-запутанного ЭПР-состояния света. Метод позволяет вернуть уровень запутанности ЭПР-состояния, испытавшего сколь угодно большие оптические потери, до макроскопической величины. Эффективность метода продемонстрирована в экспериментальной ситуации, когда одна из мод ЭПР-состояния с исходным уровнем двумодового сжатия 0.65dB, была ослаблена в 5 и 20 раз. В обоих случаях, процедура дистилляции позволила выбрать из ослабленного ансамбля состояний под-ансамбль, имеющий первоначальный уровень квантовых корреляций.
3. Разработан метод характеристики многомодового квантового процесса; метод продемонстрирован на процессе симметричного светоделения. Успешно реконструированы квантовые аспекты процесса, в частности двух-фотонная интерференция Хонг-Оу-Манделя. Средняя ошибка определения элементов тензора не превышает 5%, параметр верности между экспериментально восстановленным тензором процесса и теоретическим ожиданием составил 95%.

Научная новизна диссертации

В диссертации представлены два оригинальных метода управления квантовым состоянием света:

1. Продемонстрирована нелокальная природа операции уничтожения фотона в части световой моды. Эффект представляет собой не исследованный ранее тип квантового действия на расстоянии, не приводящий к коллапсу волновой функции оптического состояния.
2. Впервые осуществлено восстановление уровня запутанности квантового состояния после того, как оно испытало двадцатикратные оптические потери. В отличие от существующих методов, основанных на операции вычитания фотона [15, 16], разработанная техника использует бесшумовое усиления света [30]; благодаря этому, предложенный протокол является первым, который не имеет принципиальных ограничений на величину усиления квантовой запутанности.

Кроме того, в диссертации представлена техника, впервые позволившая характеризовать двумодовый квантовый процесс на произвольной области оптического гильбертова пространства; техника представляет собой развитие одномодового метода [31]. Главной особенностью многомодового случая является необходимость учёта фазовых соотношений между входными и выходными модами процесса. С учётом этого, разработана и продемонстрирована экспериментальная методика проведения многомодовых гомодинных измерений, позволяющая получить томографически полный объём информации, достаточный для достоверной реконструкции тензора многомодового квантового процесса.

Научная и практическая значимость исследования

1. Нелокальные свойства оператора уничтожения фотонов.

Нелокальная природа оператора уничтожения фотонов является общей для всех бозонных систем. Например, в случае конденсированного состояния Бозе-Эйнштейна, операции уничтожения кванта соответствует удаление группы атомов из конденсата. В соответствии с предсказанием, локальное выполнение такого действия не должно приводить к изменению формы коллективного квантового состояния.

Эффект является уникальным по своей области действительности: свойство отсутствия тени сохраняется независимо от степени классичности / квантовости бозонного состояния. При этой универсальности, эффект может быть достигнут только с помощью квантово-механических манипуляций, так как в классической физике отсутствует аналог операции уничтожения фотона.

Эффект имеет практическую значимость в области инженерии квантовых состояний света. С помощью эффекта нелокальности, широко применяемая операция вычитания фотона [32] может выполняться удалённо, либо без обладания полной информацией о структуре моды целевого состояния.

2. Дистилляция запутанности Эйнштейна-Подольского-Розена.

Этап концентрации квантовых свойств оптического состояния необходим для практической реализации технологий квантовой криптографии и вычислений [33,34]. Разработанный метод позволил получить после двадцатикратного оптического ослабления ансамбль состояния более запутанных, чем результат аналогичного ослабления бесконечно-запутанного состояния света — то есть, преодолеть детерминистический предел. Это достижение является ключевым для создания эффективного квантово-оптического повторителя [35].

3. Томография многомодового квантового процесса.

Разработка метода характеристики многомодового квантового чёрного ящика представляет собой необходимое условие для дальнейшего развития и масштабирования квантовых технологий. Разработанный метод выгодно отличается от существующих: отсутствием ограничений на размер исследуемой области квантового гильбертова пространства — в сравнении с [25], неограниченностью числа мод процесса — в сравнении с [26,31], простотой экспериментальной техники, требующей лишь набор пробных когерентных состояний и гомодинных измерений в выходных модах процесса — в сравнении с [27], а также отсутствием предположений о свойствах неизвестного процесса — в сравнении с [28,29]. Таким образом, предложенная нами техника сегодня представляет собой наиболее мощный и удобный метод характеристики квантовых процессов.

Личный вклад автора

В составе научной группы, автор играл ключевую роль в постановке задач, разработке, постройке и юстировке оптических и электронных схем, теоретическом моделировании эксперимента, проведении измерений. Автором произведена большая часть работы по анализу экспериментальных данных, а также по подготовке текстов для публикации результатов работ.

Апробация работы

Результаты работы были представлены в 8 докладах на 7 международных конференциях. Список приведён после содержания работы.

Публикации

По результатам работы опубликованы 3 статьи в ведущих международных журналах, входящих в перечень ВАК. Список приведён после содержания работы.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, благодарностей и списка литературы. Объём диссертации составляет 107 страниц, включая 47 рисунков и 1 таблицу. Список литературы включает 182 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении представлена картина актуальных задач квантово-оптических технологий в области диссертационной работы; сформулирована цель работы, обоснована её актуальность. Перечислены полученные результаты, показана их новизна, а также научная и практическая ценность. Описана структура диссертации.

Глава 1 посвящена исследованию нелокальных свойств оператора уничтожения фотонов. Глава начинается с узкоспециализированного введения и обзора соответствующей литературы. Кратко описан феномен явления квантовой нелокальности, представлены примеры его использования в технологиях квантового света. Вводится понятие разрушающего и не-разрушающего квантово-механического действия на расстоянии.

В разделе **1.1** описывается теоретическая концепция эффекта. Состояние $|\psi\rangle$ в моде света, определяемой оператором уничтожения \hat{a} , распределяется между двумя удалёнными сторонами, Алисой и Бобом, с помощью светоделителя. В моде Алисы \hat{a}_1 выполняется операция уничтожения фотона, после чего моды А и Б рекомбинируют, завершая интерферометр Маха-Цейндера, как показано на Рис. 1.

Интуитивно можно было бы ожидать, что в результате такого вычитания фотона энергия моды А уменьшится, а энергия моды Б не изменится. Как следствие, рекомбинация на выходном светоделителе должна нарушиться. Однако, квантово-механический расчёт предсказывает, что энергия уменьшится в обеих модах, причём так, что пропорция между ними останется на первоначальном уровне. Такое изменение состояния моды Б в результате действия в удалённой моде А есть признак нелокальности явления.

От множества известных нелокальных квантово-механических эффектов, описанный феномен отличается тем, что в этом случае *действие на расстоянии* не вызывает коллапса распределённого состояния, сохраняя его первоначальную структуру и двумодовую запутанность; так, согласно расчёту, после вычитания фотона в части А, моды А и Б идеально рекомбинируют на замыкающем светоделителе интерферометра, оставляя одну из выходных мод в вакуумном состоянии. Наиболее краткая формулировка эффекта таким образом имеет вид

$$\hat{a}_1 |N\rangle_a \propto |N-1\rangle_a, \quad (1)$$

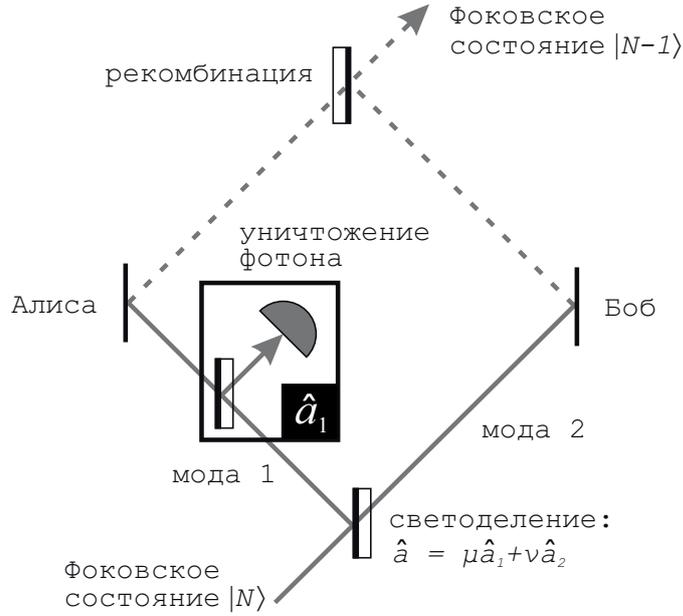


Рис. 1: Эффект квантового вампира. Когда состояние $|\psi\rangle$ в моде света, определяемой оператором уничтожения \hat{a} распределено между двумя удалёнными сторонами, уничтожение фотонов \hat{a}_1 в одной из сторон действует на состояние $|\psi\rangle$ глобально. Это может быть проверено, например, анализируя результирующее состояние рекомбинированных мод \hat{a}_1 и \hat{a}_2 на другом светоделителе.

где $|k\rangle_a$ обозначает фоковское, k -фотонное состояние света в моде \hat{a} .

Уравнение (1) в частности означает, что операция уничтожения фотона в части световой моды не оставляет тени; отсюда аналогия с мифическим вампиром, давшая название эффекту. В тексте приводится детальное обсуждение кажущегося противоречия с фактом повседневного наблюдения теней.

Раздел 1.2 посвящён описанию эксперимента, в котором проверяется предсказание (1). В эксперименте, интерферометр Маха-Цейндера реализован в поляризационном базисе, так что под-моды \hat{a}_1 и \hat{a}_2 есть горизонтальная и вертикальная компоненты диагонально-поляризованной моды \hat{a} . Начальное состояние последней приготавливалась с помощью невырожденного процесса спонтанного параметрического рассеяния на кристалле титанил-фосфата калия, Рис. 2. Срабатывание одного или пары однофотонных детекторов ДОФ1 и ДОФ2 во вспомогательной моде сигнализирует о приготовлении моды \hat{a} в одно- или двух-фотонном фоковском состоянии.

Вычитание фотона в моде А осуществляется с помощью частично-поляризационного светоделителя, направляющего на однофотонный счётчик ДОФ3 6% лишь горизонтально-поляризованной компоненты моды \hat{a} . Сраба-

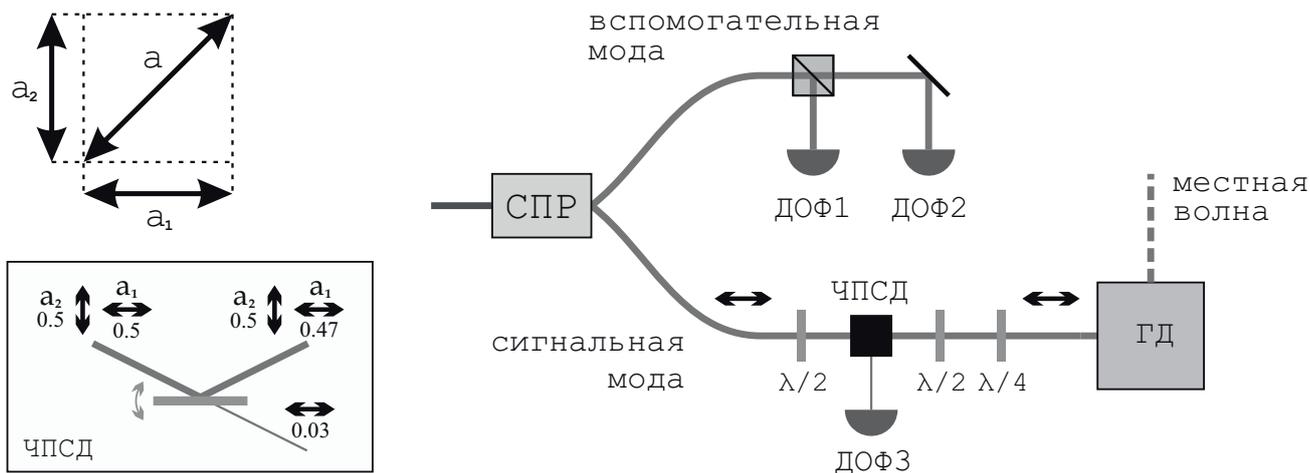


Рис. 2: Оптическая схема эксперимента. Волновые пластинки образуют интерферометр Маха-Цейндера в поляризационном базисе. Фотон вычитается из горизонтальной компоненты \hat{a}_1 моды \hat{a} с помощью частично-поляризационного светоделиителя (ЧПСД). Его импровизированная реализация показана на нижней вставке. Стрелки и числа показывают поляризации мод и их относительные интенсивности. СПР, спонтанное параметрическое рассеяние. ДОФ, детектор одиночных фотонов. ГД, гомодинный детектор.

тывание этого детектора сигнализирует об успешной реализации уничтожения фотона [32, 36].

Характеризация рекомбинировавшего состояния на выходе интерферометра осуществляется с помощью гомодинной томографии [37]. Квадратурные данные гомодинного детектора [38], соответствующие исходному состоянию моды \hat{a} , записываются по условию срабатывания нужной комбинации сигналов ДОФ1 и ДОФ2. В случае, когда одновременно срабатывает детектор ДОФ3, измеренная квадратура соответствует состоянию после вычитания фотона в моде А.

Гомодинный детектор настроен на приём выходной моды интерферометра, в которую сигнал идёт в случае идеальной рекомбинации; в использовавшейся поляризационной схеме, это горизонтально-поляризованная мода. В случае нарушения качества рекомбинации, часть сигнала направляется в холостую выходную моду и теряется. Таким образом, эффективность гомодинного детектирования зависит от сохранения либо возмущения структуры рекомбинирующего состояния, и может быть использована для подтверждения или опровержения предсказания (1).

Раздел 1.3 содержит описание обработки и анализа данных гомодинного детектора. Основные результаты показаны на Рис. 3; видно, что рекомбини-

ровавшее состояние мод А и Б близко к чистому фоковскому, содержащему на один фотон меньше, чем исходное — в согласии с (1) и явном расхождении с расчётом в рамках локальной модели (пунктир). Незначительный уровень смешанности выходных состояний объясняется шумовыми срабатываниями вычитающего детектора ДОФЗ. Раздел содержит детальное обсуждение этой и других экспериментальных неидеальностей.

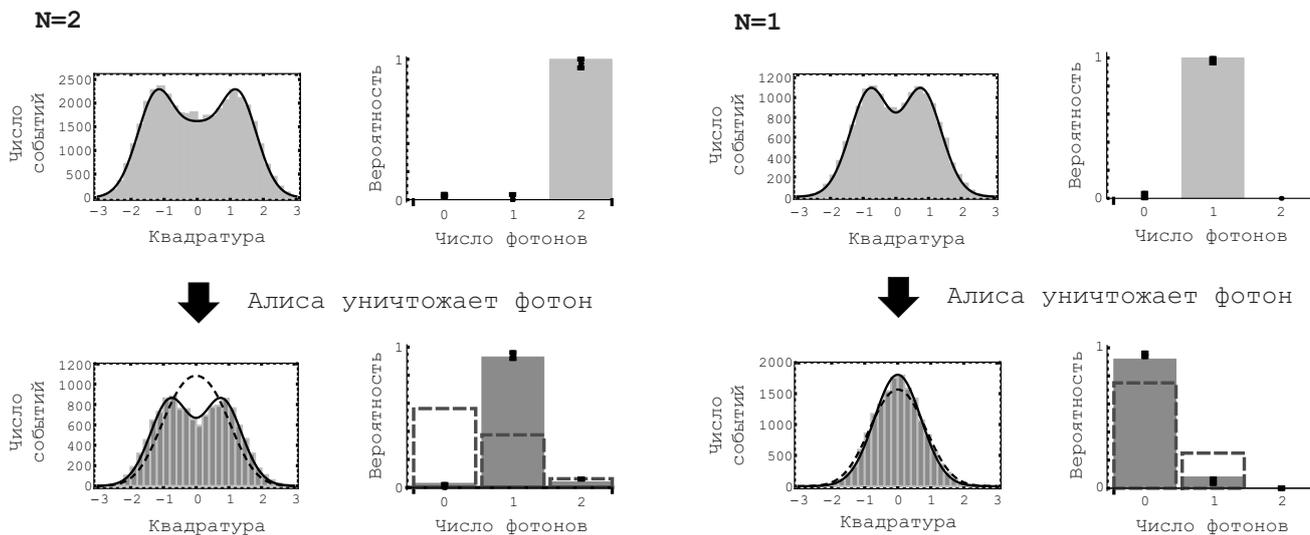


Рис. 3: Рекомбинировавшее состояние мод 1 и 2 в случаях, когда мода \hat{a} первоначально находится в одно- ($N=1$) и двух-фотонном ($N=2$) фоковском состоянии. Сверху / снизу: состояния перед / после вычитания. Гистограммы показывают распределение результатов гомодинных измерений, левее — диагональные элементы соответствующих матриц плотности в фоковском базисе. Цветные прямоугольники: теоретическое моделирование, точки — экспериментальный результат. Пунктирные линии показывают ожидание предположении локального эффекта от вычитания фотона.

Раздел 1.4 посвящён вопросу о передаче информации с помощью эффекта Квантового вампира. Может показаться, что обсуждаемый эффект позволяет по желанию изменять энергию удалённой моды света; так как квантовомеханическое действие на расстоянии происходит мгновенно, это означало бы возможность сверх-световой коммуникации.

Строгий расчёт показывает, что неудача — как и успех — при попытке Алисы уничтожить фотон в своей моде модифицирует двумодовое состояние. В отличие от успешного вычитания, неудача приводит к увеличению энергии моды Боба; амплитуды и вероятности двух исходов взвешены так, что ожидаемые изменения энергии в точности равно нулю.

Невозможность детерминистической реализации оператора уничтожения

фотона является его фундаментальным свойством, как и свойством любого не-эрмитового оператора [36]. Именно эта вероятностная природа запрещает сверх-световую передачу информации с помощью эффекта Квантового вампира — как и с помощью любого действия на расстоянии.

Раздел 1.5 содержит выводы о данной части работы. Природа нелокальности оператора уничтожения фотона является универсальной; эффект Квантового вампира может быть перенесён на оптические моды в любом базисе: временном, пространственном, спектральном, и т.д. Более того, эффект является общим для всех бозонных систем. Практическая значимость эффекта лежит в области инженерии квантовых состояний света. Используя свойство нелокальности, широко применяемая операция вычитания фотона [32] может выполняться удалённо, либо без обладания полной информацией о структуре моды целевого состояния.

Интересно, что эффект Квантового вампира не требует наличия квантовой запутанности между модами \hat{a}_1 и \hat{a}_1 , которая имеется только в случае, когда состояние моды \hat{a} неклассично. Например, если исходное состояние является когерентным, состояния мод 1 и 2 также являются когерентными. Так как это — собственные состояния оператора уничтожения, то его действие не приведёт к изменениям. Аналогичным образом, то же явление будет наблюдаться и для других неклассических, но и не запутанных состояний (например, состояний нулевого дискорда [39]).

Таким образом, эффект Квантового вампира является уникальным по области его действительности: свойства действия на расстоянии и отсутствия тени сохраняются независимо от степени классичности / квантовости бозонного состояния. При этой универсальности, эффект может быть достигнут только с помощью квантово-механических манипуляций: в классической физике отсутствует аналог операции уничтожения фотона.

Глава 2 посвящена решению задачи о концентрации — вероятностном усилении — квантовой запутанности двумодового состояния Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР), волновая функция которого в фоковском базисе имеет вид

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\cosh \gamma} \sum_{n=0}^{\infty} \tanh^n \gamma |n, n\rangle, \quad (2)$$

где γ есть параметр сжатия, а $|n, n\rangle = |n\rangle_a \otimes |n\rangle_b$ есть состояние с n фотонами в каждой из мод a, b . Состояние (2) является главным ресурсом для квантовых технологий в непрерывных переменных [40]. Настоящий результат представляет собой способ преодоления основного препятствия для практической реализации многих из них, а именно разрушения запутанности состояния (2) при передаче или хранении [34, 35]. Глава начинается со специализированного введения и обзора литературы.

Раздел 2.1 посвящён описанию оригинальной методики приготовления состояния (2). Методика состоит в приготовлении пары одномодовых, ортогонально-сжатых состояний света и последующей их интерференции на симметричном светоделителе. Выходные моды светоделителя при этом переходят в состояние (2). В разделе описывается экспериментальная установка с

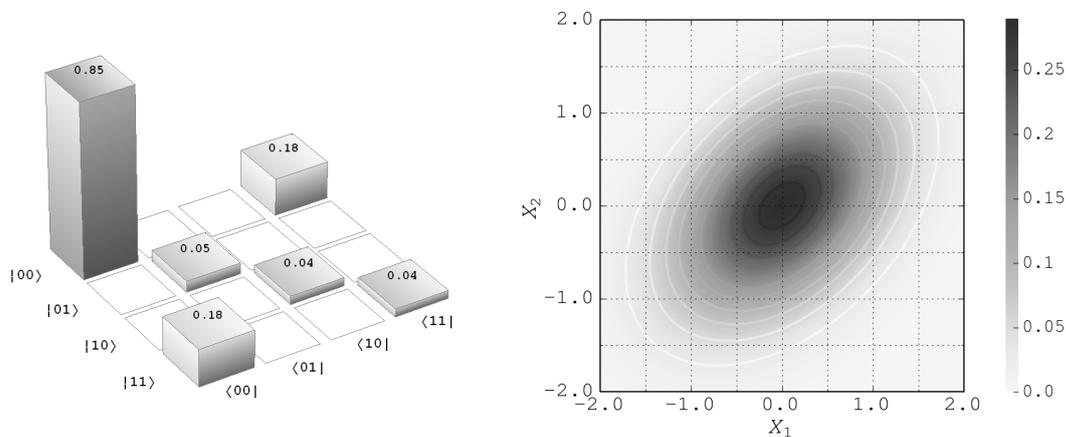


Рис. 4: Экспериментально полученное состояние (2). Слева: матрица плотности в фоковском базисе. Справа: квадрат модуля волновой функции в координатном представлении.

процедурой настройки, а также методика характеристики двумодового состояния с помощью гомодинных измерений. Результат гомодинной томографии приготовленного состояния показан на Рис. 4. Параметр близости к теоретическому ожиданию (2) при $\gamma = 0.44$ составляет 99.5%.

Раздел 2.2 описывает концепцию бесшумового усиления света, а также его экспериментальную реализацию — *квантовый катализ* [30] — ключевой элемент процедуры дистилляции. Это одномодовая операция, позволяющая вероятностным образом выполнить преобразование

$$|0\rangle + \alpha |1\rangle \rightarrow |0\rangle + g\alpha |1\rangle, \quad (3)$$

где $\alpha \ll 1$, а g - коэффициент усиления. Для выполнения квантового катализа

целевая мода света должна проинтерферировать со вспомогательной модой, приготовленной в однофотонном состоянии. После интерференции на светоделителе, вспомогательная мода направляется на однофотонный счётчик, по срабатыванию которого в сигнальной моде происходит преобразование (3); усиления g при этом равно обратному коэффициенту пропускания светоделителя.

В разделе показано, как квантовый катализ можно использовать для концентрации запутанности ЭПР состояния. В эксперименте моделируется ситуация, когда одна из мод ЭПР состояния (2) проходит через канал потерь с пропусканием τ . В результате, (2) переходит в смешанное состояние (здесь и далее нормировка опускается)

$$\rho_{\text{att}}(\gamma, \tau) = (|00\rangle + \gamma\tau |11\rangle)(\langle 00| + \gamma\tau \langle 11|) + \gamma^2(1 - \tau^2) |01\rangle \langle 01|, \quad (4)$$

обладающее меньшей, по сравнению с (2), запутанностью. Осуществление операции (3) в ослабленной моде преобразует (4) в

$$\rho_{\text{dist}}(\gamma, \tau, g) = \left[\frac{1}{g} |00\rangle + \gamma\tau |11\rangle \right] \left[\frac{1}{g} \langle 00| + \gamma\tau \langle 11| \right] + \frac{\gamma^2(1 - \tau^2)}{g^2} |10\rangle \langle 10|, \quad (5)$$

которое в пределе $\gamma^2/g^2 \ll 1$ есть чистое состояние (2) с параметром сжатия $\gamma\tau g$. Таким образом, выполнение квантового катализа с усилением $g = 1/\tau$, теоретически, позволяет вернуть запутанность ослабленного ЭПР состояния (4) на первоначальный уровень.

Раздел **2.3** посвящён описанию экспериментальной установки и процедуры её настройки. Одна из мод исходного ЭПР состояния проследует на гомодинный детектор (ГД), тогда как другая претерпевает ослабление, подвергается бесшумовому усилению методом квантового катализа, после чего также детектируется. Об успехе дистилляции сигнализирует одновременное срабатывание двух однофотонных детекторов: 1. приготавливающего вспомогательное однофотонное состояние и 2. осуществляющего квантовый катализ. Показания двух ГД позволяют реконструировать двумодовое состояние как до, так и после дистилляции.

Главной трудностью эксперимента являлось получение информации о фазе дистиллированного состояния; для этого, параллельно с записью дистиллированных событий осуществлялось скоростное измерение остаточных корреляций исходного ЭПР состояния. Чтобы поднять их уровень до измеримого,

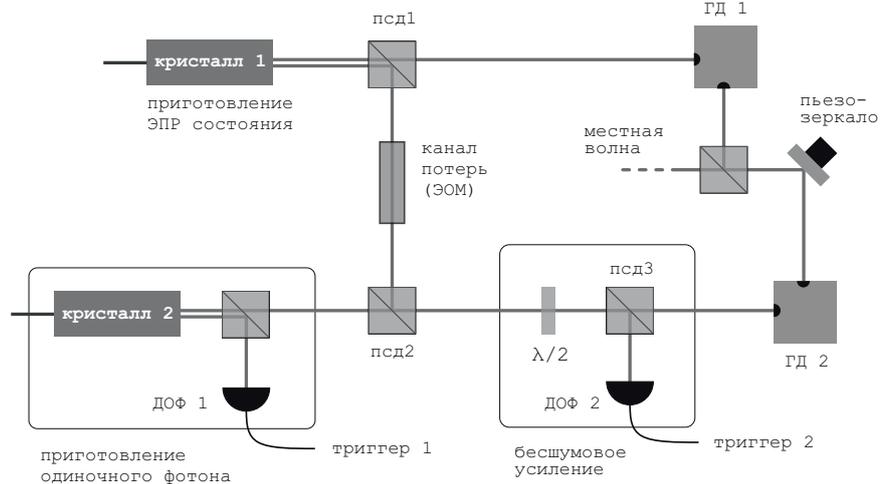


Рис. 5: Оптическая схема эксперимента. ПСД, поляризационный светоделитель. ДОФ, детектор одиночных фотонов. ГД, гомодинный детектор.

пропускание канала потерь, реализованного с помощью электро-оптического модулятора, периодически поднималось до 100%.

В разделе 2.4 описывается система сохранения результатов измерений, а также процедура последующего анализа. Система сохранения данных состоит из осциллографа, сохраняющего показания ГД в моменты успешной дистилляции, и аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), измеряющего текущую фазу. Синхронизация между двумя машинами осуществлялась по локальной сети. Кроме этого, использовались два генератора сигналов, управляющих модулятором в канале потерь и пьезо-зеркалом в одной из местных волн.

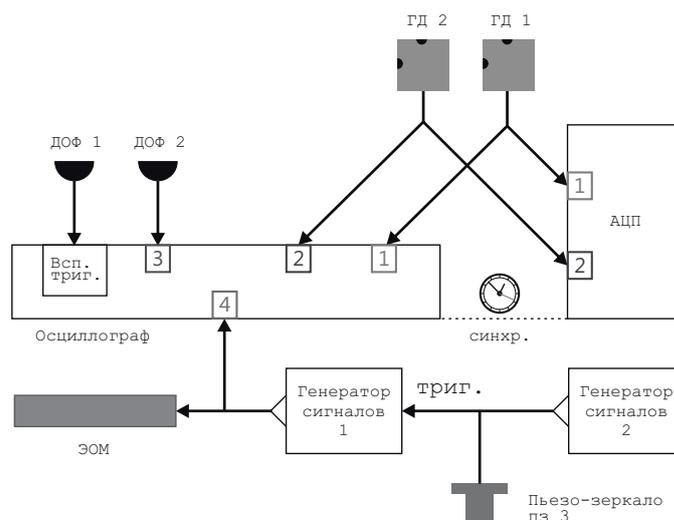


Рис. 6: Система записи данных. ДОФ, детектор одиночных фотонов. ГД, гомодинный детектор. АЦП, аналогово-цифровой преобразователь. ЭОМ, электро-оптический модулятор.

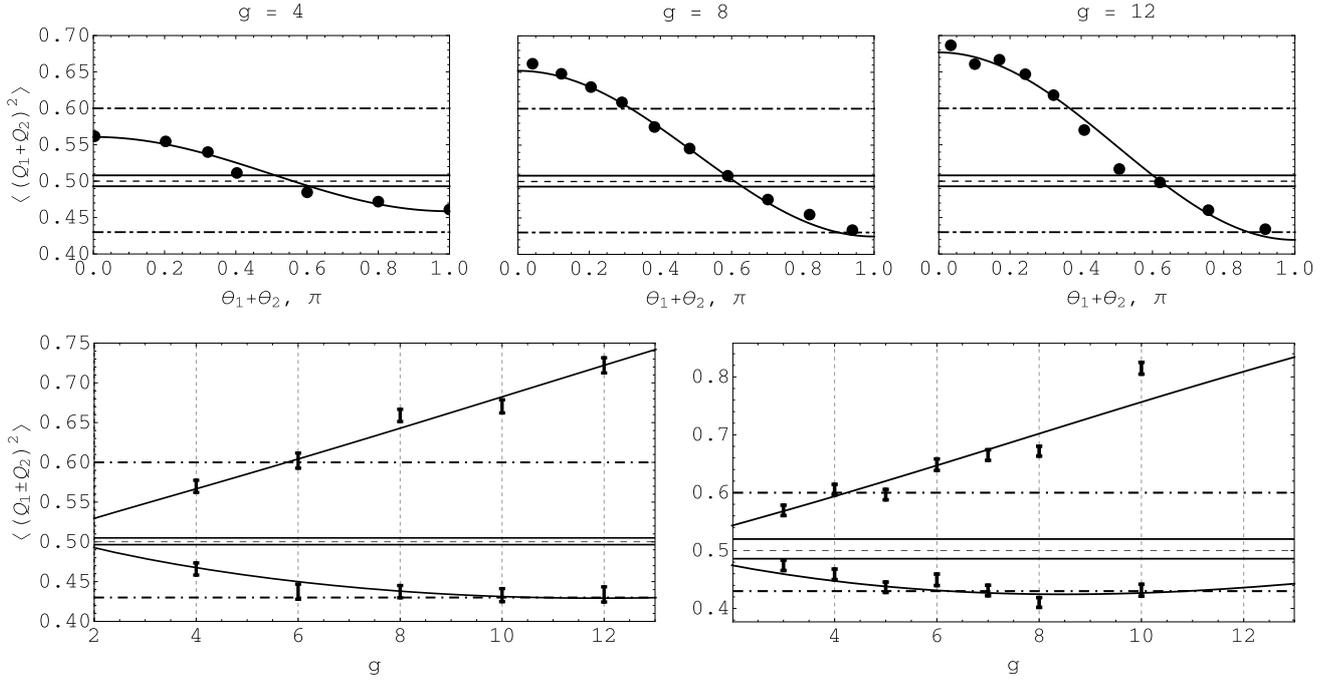


Рис. 7: Штрих – пунктирные / сплошные линии: уровень сжатия и антисжатия исходного состояния / ослабленного состояния перед дистилляцией. Пунктир: уровень вакуумного шума. Верхние панели: дисперсия суммы квадратур в зависимости от суммы фаз местных волн для состояний, испытавших 20-кратное ослабление и дистиллированных при усилениях $g = 4, 8, \text{ и } 12$. Точки: экспериментальные данные. Кривые: теоретическое ожидание для состояния (2). Нижние панели: максимальное сжатие и анти-сжатие дистиллированного состояния в зависимости от коэффициента усиления g . Точки: экспериментальные результаты. Кривые: результат расчёта, выполненного А. Улановым.

В разделе 2.5 описаны результаты эксперимента. Первичный анализ данных состоит в построении зависимости дисперсии суммы квадратур в двух модах от суммы фаз местных волн, показанной на верхних панелях Рис. 7. Минимум этой дисперсии является мерой запутанности ЭПР состояния. На нижних панелях Рис. 7 показаны результаты двух серий экспериментов, для ослабления исходного ЭПР состояния на 95%, слева и 80%, справа. В обоих случаях видно, что дистилляция позволяет вернуть запутанность на первоначальный уровень.

Набор двумодовых квадратурных данных позволяет полностью характеризовать ЭПР состояния. Рис. 8 показывает, слева направо, результаты реконструкции исходного ЭПР состояния, того же состояния, прошедшего через 20-кратные потери и для дистиллированного при $g = 12$ ансамбля. Дистиллированное состояние имеет с исходным верность 97%.

Раздел 2.6 содержит выводы данной главы. Сравнение с другими метода-

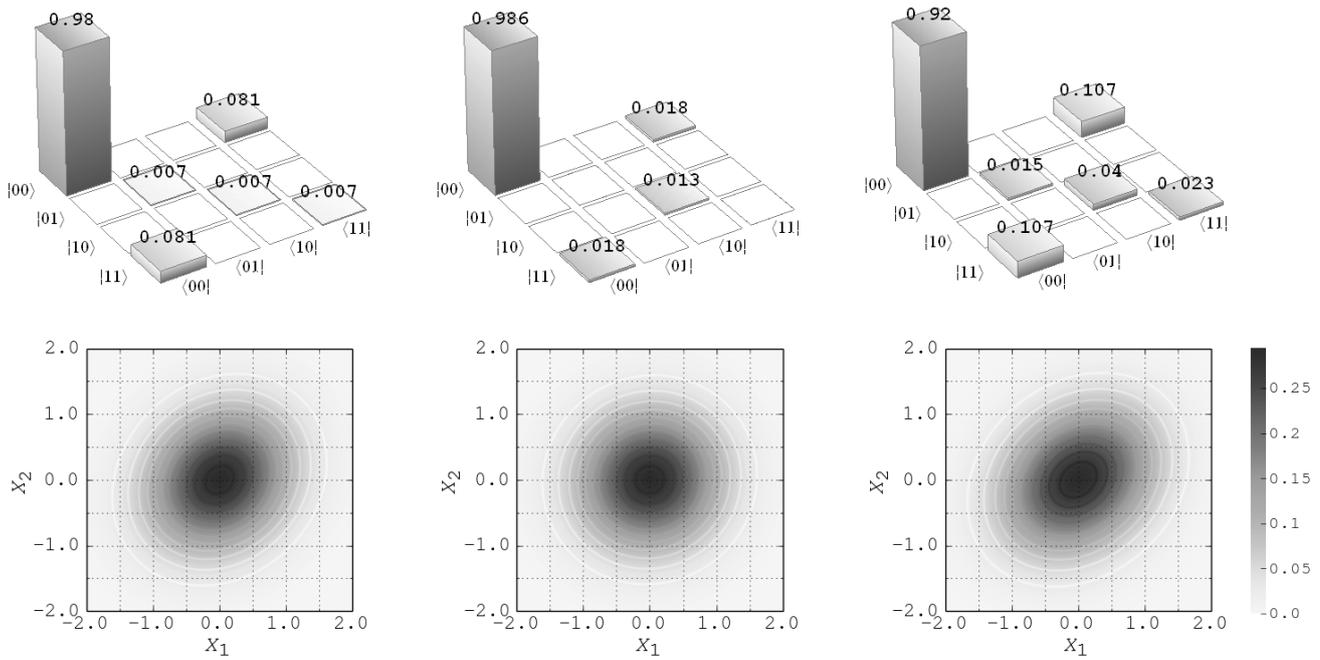


Рис. 8: Слева направо: матрицы плотности и квадраты амплитуд волновых функций исходного, ослабленного и дистиллированного состояний.

ми дистилляции запутанности [41] показывает, что разработанная в настоящей работе техника особенно эффективна в случаях слабого исходного сжатия и/или высоких потерь в канале пропускания. В отличие от дистилляции запутанности с помощью пост-селектирования в ослабленной моде [42], представленный метод позволяет получить свободно-распространяемое дистиллированное состояние. При этом, метод позволяет восстановить запутанность после прохождения сколь угодно высоких потерь. Это достижение является значительным шагом в сторону практической реализации протокола коррекции ошибок, а в конечном итоге — квантового повторителя в непрерывных переменных [43].

В силу однофотонной природы операции квантового катализа, дистиллированное состояние (5) не содержит многофотонных компонент. Это обстоятельство ограничивает достижимые значения запутанности и сжатия. Можно предложить ряд способов преодолеть это препятствие. В частности, негауссово состояние (5) может быть далее подвергнуто гауссифицирующей процедуре дистилляции [44, 45]. Теоретически, таким образом может быть получено бесконечно-сжатое ЭПР состояние.

Глава 3 посвящена задаче о характеристике неизвестного многомодового квантового процесса. Текст начинается с введения в проблематику: характеристика — или томография — квантовых процессов является юстировочным инструментом, необходимым для отладки взаимодействия элементарных квантовых протоколов [46, 47]. Подробно обсуждается текущее состояние исследований в данной области [24–29].

В этой главе, метод известный как MaxLik csQPT [31] расширяется за пределы случая “один вход — один выход который охватывает лишь малую часть практически важных квантовых процессов. Необходимость этого исследования продиктована растущим объёмом квантовых технологий, многие из которых являются многомодовыми. К последним всецело относятся нелокальные методы манипуляции квантовыми состояниями, которые основаны на использовании корреляций между двумя и более подсистемами общего запутанного квантового состояния света. Важнейшую часть многомодовых процессов составляют логические операции для обработки квантовой информации [48, 49].

В разделе 3.1 приводится описание многомодовой концепции метода MaxLik csQPT. Ключевым является использование изоморфизма Ямилковского [50], который любому квантовому процессу на пространстве операторов плотности — супероператору \mathcal{E} — ставит в соответствие оператор, заданный на произведении входного и выходного гильбертовых пространств \mathcal{H} и \mathcal{K} :

$$\hat{E} = \sum_{\underline{n}, \underline{m}, \underline{j}, \underline{k}} \mathcal{E}_{\underline{j}, \underline{k}}^{\underline{n}, \underline{m}} |\underline{n}\rangle_{\mathcal{H}} \langle \underline{m}| \otimes |\underline{j}\rangle_{\mathcal{K}} \langle \underline{k}|, \quad (6)$$

где многомодовые фоковские индексы $|\underline{i}\rangle = |i_1, \dots, i_M\rangle$ нумеруют базисные вектора пространств \mathcal{H} и \mathcal{K} .

Соответствие (6) позволяет свести задачу о характеристике процесса к задаче о характеристике многомодового квантового состояния [37, 46, 47]. Для её решения, достаточно получить томографически-полный массив измерений для каждого из набора входных состояний, охватывающих исследуемую область многомодового гильбертова пространства. В силу оптической эквивалентности [51], в качестве пробных состояний могут быть использованы легко доступные когерентные; измерение выходных мод процесса осуществляется с помощью гомодинных детекторов [38]. Полученный набор данных используется для реконструкции оператора (6) в ходе оптимизации функционала

правдоподобия

$$\mathcal{L}(\hat{E}) = \sum_{j,i} \ln p(\alpha_j, i), \quad (7)$$

где $p(\alpha, i)$ есть вероятность регистрации результата i -го измерения для пробного состояния $|\alpha\rangle$. Оптимизация правдоподобия (7) осуществляется с помощью итерационного алгоритма. В результате определяется тензор (6), наилучшим образом описывающий набор экспериментальных данных.

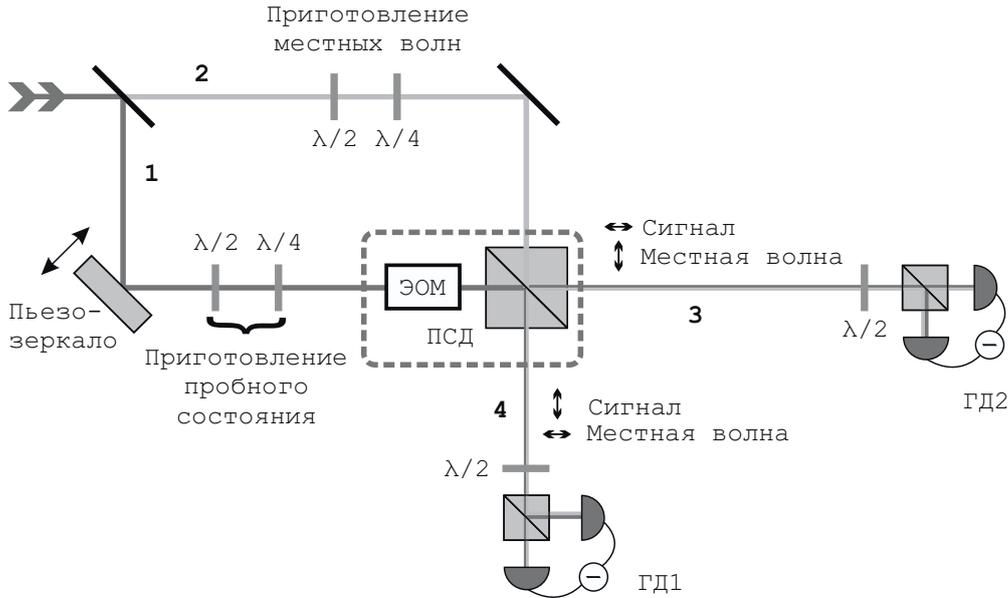


Рис. 9: Оптическая схема эксперимента. Входные каналы процесса являются вертикальной и горизонтальной компонентами пространственной моды 1; выходные каналы разделены на пространственные моды 3 (горизонтальная поляризация) и 4 (вертикальная). Местные волны, показанные светло-серым, необходимы для гомодинного детектирования и подаются на поляризационный светоделитель ПСД в поляризационных модах пучка 2. После светоделения, они появляются в пространственных модах 3 и 4 с поляризациями, ортогональными сигналу. ГД, гомодинный детектор.

Раздел 3.2 посвящён описанию методики эксперимента. В роли чёрного ящика выбран двумодовый процесс светоделения, реализованный в поляризационном базисе с помощью электро-оптического модулятора (ЭОМ) и поляризационного светоделителя (ПСД). Оптическая схема показана на Рис. 9. В разделе детально описывается процедура настройки установки, использованные пробные состояния, а также методика получения томографически-полного набора гомодинных измерений в выходных каналах процесса.

Раздел 3.3 содержит описание процедуры обработки данных, оптимальной для согласования экспериментальной и программной частей. Главной слож-

ностью и достижением настоящей работы является разработка методики получения набора данных, содержащего информацию о фазовых соотношениях между каналами неизвестного процесса. Методика позволяет установить соответствие между измерениями в классическом и квантовом режимах, и таким образом провести первичную проверку экспериментальных данных на физическую адекватность. Разработанная методика не требует проведения ресурсоёмкой оптимизации правдоподобия, что значительно ускоряет настройку экспериментальной части.

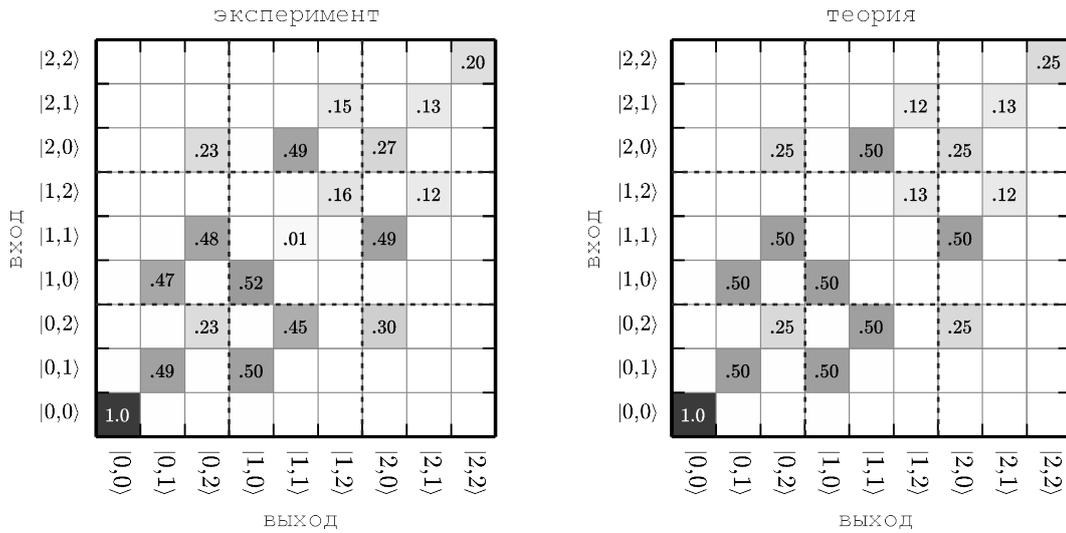


Рис. 10: Элементы тензора, соответствующие диагональным элементам входных и выходных матриц плотности в фоковском базисе. Ненулевые вероятности переходов даны числами. Реконструкция ограничена максимальным числом фотонов 2. Слева: результат экспериментальной реконструкции. Справа: теоретическое ожидание.

Далее в разделе приведены результаты реконструкции процесса. Рис. 10 показывает элементы тензора процесса, соответствующие вероятностям переходов фоковских компонент входного двумодового состояния в соответствующие компоненты выходного. Элемент $|1, 1\rangle \rightarrow |1, 1\rangle$ соответствует вероятности того, что в результате интерференции двух однофотонных состояний света, на выходе светоделителя фотоны направляются в разные моды. Близость к нулю этого элемента объясняется исключительно квантовым характером двухфотонной интерференции, и соответствует вероятности одновременного срабатывания однофотонных детекторов в эксперименте Хонг-Оу-Манделя [52].

Данные, представленные на Рис. 10, являются лишь малой частью — диагональными элементами — полного тензора, показанного на Рис. 11. Его элементы являются в общем случае комплексными числами; именно они определяют

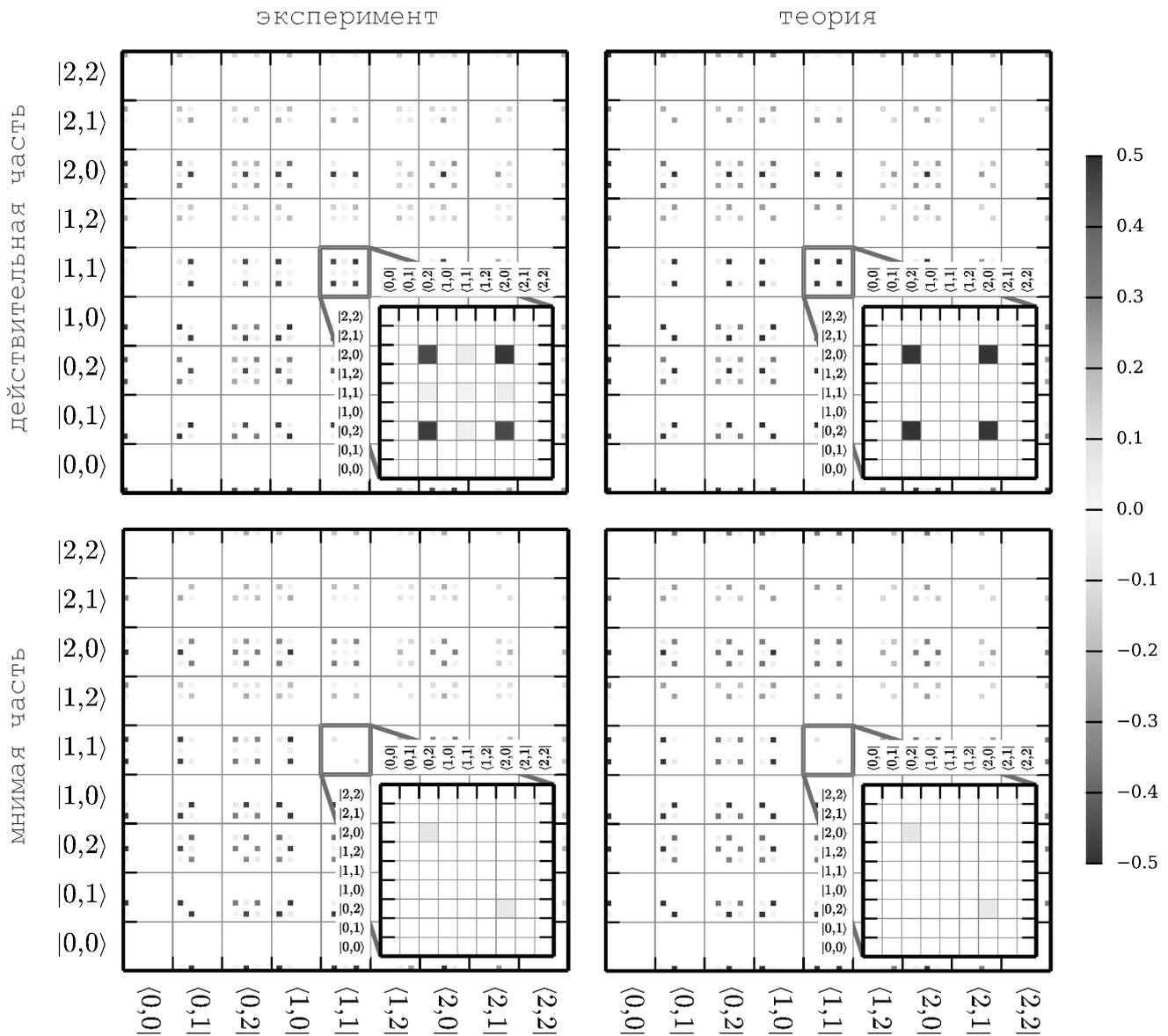


Рис. 11: Полный тензор процесса симметричного светоделения. Сверху: результат реконструкции. Снизу: теоретическое ожидание. Действительной и мнимой частям соответствуют левая и правая колонки. Каждая клетка соответствует элементу входной двумодовой матрицы плотности, тогда как её содержимое соответствует выходной матрице плотности. Вставки показывают ответ чёрного ящика на входное состояние $|1, 1\rangle$, когда в обе входных моды находятся в однофотонных состояниях. Полноцветная версия доступна в печатном тексте диссертации и на сайте www.lebedev.ru.

фазовое поведение чёрного ящика, и являются равно важными для характеристики процесса. Внешние фоковские индексы соответствуют матрице плотности входного состояния. Для каждого набора внешних индексов, содержание соответствующей клетки даёт матрицу плотности выходного двумодового состояния в фоковском базисе. Теоретическое ожидание для тензора симметрич-

ного светоделения показано на нижних панелях Рис. 11. Параметр верности между двумя тензорами составляет 95%. Расхождение вызвано неидеальностью реализации процесса светоделения, ограниченным набором данных, а также неточностью реконструкции вследствие конечного числа итераций.

Выводы данной главы приведены в разделе 3.4. Предложен метод экспериментальной характеристики многомодовых квантовых процессов. Его реализация продемонстрирована на примере наиболее распространённого многомодового оптического процесса — светоделения. Метод показал свою эффективность в реконструкции квантовых аспектов процесса, в частности эффекта Хонг-Оу-Манделя. Средняя ошибка определения матричных элементов составляет 5%, а параметр верности между экспериментально восстановленным тензором процесса и теоретическим ожиданием равен 95%. Благодаря простоте требуемых измерений и приготовления пробных состояний, представленный метод может быть применён к другим процессам, обобщён на другие физические системы, а также масштабирован до большего числа каналов и более широких пространств состояний.

В главе 4 описаны экспериментальные и теоретические методы, использовавшиеся в ходе работы. Раздел 4.1 посвящён временному, спектральному, пространственному и поляризационному контролю лазерного излучения. В разделе 4.2 описывается концепция, а также практическая реализация гомодинных измерений. Разделы 4.3 и 4.4 посвящены теоретическому описанию сжатых состояний света и экспериментальным методикам работы с ними. В разделе 4.5 приводятся методы характеристики нелинейных свойств кристалла с помощью классических экспериментов. Раздел 4.6 посвящён синтезу фоковских состояний света.

Выводы

1. Уничтожение фотона в части распределённой световой моды имеет нелокальный эффект, приводящий к неразрушающей модификации квантового состояния этой моды. В результате такого уничтожения фотона, энергия вычитается из всей моды света без возмущения её структуры (пространственной, поляризационной, временной и т.д.); при этом, энергия удалённых частей световой моды изменяется на соответствующую долю светового кванта.

2. Разработан метод концентрации запутанности двумодового квантового состояния света Эйнштейна–Подольского–Розена. Экспериментально продемонстрировано восстановление величины двумодовых квадратурных корреляций квантового состояния, испытавшего двадцатикратные оптические потери, до исходного уровня. Метод превосходит по своим возможностям все известные в настоящее время, и является особенно эффективным в случае высоких потерь и / или малой величины исходной запутанности.
3. Разработан метод характеристики неизвестного, многомодового квантового процесса. Метод отличается от других экспериментальной простотой, допускающей масштабирование техники на задачи более высоких размерностей. Метод продемонстрирован на примере двумодового процесса симметричного светоделения. Параметр верности реконструкции классических и квантовых аспектов процесса составил 95%.

Результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. **Илья А. Федоров**, Alexander E. Ulanov, Yury V. Kurochkin and A. I. Lvovsky, Quantum vampire: collapse-free action at a distance by the photon annihilation operator. *Optica* **2** 112-115 (2015)
2. Alexander E. Ulanov, **Илья А. Федоров**, Anastasia A. Pushkina, Yury V. Kurochkin, Timothy C. Ralph and A. I. Lvovsky, Undoing the effect of loss on quantum entanglement. *Nature Photonics* **9**, 764–768 (2015)
3. **Илья А. Федоров**, Aleksey K. Fedorov, Yury V. Kurochkin and A.I. Lvovsky, Tomography of a multimode quantum black box. *New Journal of Physics* **17** 043063 (2015)

и доложены на всероссийских и международных конференциях:

1. **I.A. Fedorov**, A.E. Ulanov, A.A. Pushkina, Y.V. Kurochkin, T.C. Ralph, A.I. Lvovsky, Quantum optics experiments at the Russian Quantum Center, *XII International Workshop on Quantum Optics 2015*, приглашённый. Россия, Троицк, Август 2015. Сборник тезисов стр. 32.
2. **I.A. Fedorov**, Y.V. Kurochkin, A.I. Lvovsky, Quantum Vampire: action at a distance of the photon annihilation operator, *Quantum Optics 7*, Мардель-Плата, Аргентина, Октябрь 2014. Сборник тезисов стр. 10.
3. **I.A. Fedorov**, A.K. Fedorov, A.I. Lvovsky, Y.V. Kurochkin, Multimode quantum black-box characterization. *Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons 2014*, Турин, Италия. Сборник тезисов стр. 60.
4. **I.A. Fedorov**, A.E. Ulanov, Y.V. Kurochkin and A.I. Lvovsky, Quantum vampire: a new type of action at a distance. *Third International Conference on Quantum Technologies 2015*, Москва, Россия. Сборник тезисов стр. 129.
5. A.E. Ulanov, **I.A. Fedorov**, A.A. Pushkina, Y.V. Kurochkin, T.C. Ralph and A.I. Lvovsky, Continuous Variable Entanglement Distillation by means of Noiseless Linear Amplification. *22nd Central European Workshop on Quantum Optics*, 7 июля 2015, Варшава, Польша.
http://cewqo2015.fuw.edu.pl/abstracts/07Jul_1630_ConVariables_Ulanov.pdf.
6. A.E. Ulanov, **I.A. Fedorov**, A.A. Pushkina, Y.V. Kurochkin, T.C. Ralph, A. Prasad and A.I. Lvovsky, Two ways to distill Einstein-Podolsky-Rosen entanglement. *14th International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations 2015*, Гданьск, Польша. Сборник тезисов стр. 7.
7. **I.A. Fedorov**, A.E. Ulanov, Y.V. Kurochkin and A.I. Lvovsky, Quantum “vampire”: experimental demonstration of non-local nature of photon annihilation operator. *14th International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations 2015*, Гданьск, Польша. Сборник тезисов стр. 16.

Список литературы

- [1] J.L. O'Brien, A. Furusawa, J. Vučković, Photonic quantum technologies. *Nat. Phot.* **3**, 687 (2009).
- [2] D. E. Chang, V. Vuletić and M. D. Lukin, Quantum Nonlinear Optics: Photon by Photon. *Nat. Phot.* **8**, 685-694 (2014).
- [3] Q.A. Turchette, C.J. Hood, W. Lange, H. Mabuchi, and H. J. Kimble, Measurement of Conditional Phase Shifts for Quantum Logic. *Phys. Rev. Lett.* **75**, 25 (1995).
- [4] T. Peyronel, O. Firstenberg, Q. Y. Liang, S. Hofferberth, A. V. Gorshkov, T. Pohl, M. D. Lukin, V. Vuletić, Quantum nonlinear optics with single photons enabled by strongly interacting atoms. *Nature* **488** (2012).
- [5] A. I. Lvovsky, H. Hansen, T. Aichele, O. Benson, J. Mlynek, S. Schiller, Quantum state reconstruction of the single-photon Fock state. *Phys. Rev. Lett.* **87**, 050402 (2001).
- [6] E. Bimbard, N. Jain, A. MacRae, A. I. Lvovsky, Quantum state reconstruction of the single-photon Fock state. *Nat. Phot.* **4**, 243 (2010).
- [7] Anne E. B. Nielsen and K. Mølmer, Transforming squeezed light into large amplitude Schrödinger cat states. *Phys. Rev. A* **76**, 043840 (2007).
- [8] A. Ourjoumtsev, H. Jeong, R. Tualle-Brouri and P. Grangier, *Nature* **448**, 784-786 (2007).
- [9] J.S. Neergaard-Nielsen et. al, Optical Continuous-Variable Qubit. *Phys. Rev. Lett.* **105**, 053602 (2010).
- [10] J. Etesse, M. Bouillard, B. Kanseri, & R. Tualle-Brouri, Experimental Generation of Squeezed Cat States with an Operation Allowing Iterative Growth. *Phys. Rev. Lett.* **114**, 1-5 (2015).
- [11] T. Nagata, R. Okamoto, J.L. O'Brien, K. Sasaki, and S. Takeuchi, Beating the standard quantum limit with four-entangled photons. *Science* **316**, 726-729 (2007).

- [12] J.P. Dowling, Quantum Optical Metrology – The Lowdown on High-N00N States. *Contemporary Physics*, **49**(2), 125-143 (2013).
- [13] O. Morin, K. Huang, J. Liu, H. Le Jeannic, C. Fabre and J. Laurat, Remote creation of hybrid entanglement between particle-like and wave-like optical qubits. *Nat. Phot.* **8** (2014).
- [14] H. Jeong, A. Zavatta, M. Kang, S.-W. Lee, L. Costanzo, S. Grandi, T. C. Ralph and M. Bellini, Generation of hybrid entanglement of light. *Nat. Phot.* **8** (2014).
- [15] A. Ourjoumtsev, A. Dantan, R. Tualle-Brouiri, and P. Grangier, Increasing Entanglement between Gaussian States by Coherent Photon Subtraction. *Phys. Rev. Lett.* **98**, 030502 (2007).
- [16] Y. Kurochkin, A. S. Prasad, and A. I. Lvovsky, Distillation of The Two-Mode Squeezed State. *Phys. Rev. Lett.* **112**, 070402 (2013).
- [17] C. H. Bennett, and G. Brassard, Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing* **175**, 8. New York (1984).
- [18] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden, Quantum cryptography, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 145-195 (2002).
- [19] A.E. Ulanov, I.A. Fedorov, D. Sychev, P. Grangier, A.I. Lvovsky, Loss-tolerant quantum enhanced metrology and state engineering via the reverse Hong-Ou-Mandel effect. *arXiv:1601.04178* (2016).
- [20] D. Deutsch, Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer. *Proceedings of the Royal Society of London A* **400**, 97-117 (1985).
- [21] D. Gottesman and I.L. Chuang, Demonstrating the viability of universal quantum computation using teleportation and single-qubit operations. *Nature* **402**, 390 (1999).
- [22] E. Knill, R. Laflamme, and G. J. Milburn, A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *Nature* **409**, 46 (2001).

- [23] P. Kok, W.J. Munro, K. Nemoto, T.C. Ralph, Jonathan P. Dowling, and G.J. Milburn, Linear optical quantum computing with photonic qubits. *Rev. Mod. Phys.* **79**, 135 (2007).
- [24] M. Lobino, D. Korystov, C. Kupchak, E. Figueroa, B.C. Sanders, and A.I. Lvovsky, Complete characterization of quantum-optical processes. *Science* **322**, 563 (2008).
- [25] J.F. Poyatos, J.I. Cirac, and P. Zoller, Complete Characterization of a Quantum Process: The Two-Bit Quantum Gate. *Phys. Rev. Lett.* **78**, 390 (1997).
- [26] I. Bongioanni, L. Sansoni, F. Sciarrino, G. Vallone, and P. Mataloni, Experimental quantum process tomography of non trace-preserving maps. *Phys. Rev. A* **82**, 042307 (2010).
- [27] G.M. D'Ariano and P. Lo Presti, Quantum Tomography for Measuring Experimentally the Matrix Elements of an Arbitrary Quantum Operation. *Phys. Rev. Lett.* **86**, 4195 (2001).
- [28] S. Rahimi-Keshari, M. Broome, R. Fickler, A. Fedrizzi, T. Ralph and A. White, Direct characterization of linear-optical networks. *Opt. Express* **21**, 13450 (2013).
- [29] C.H. Baldwin, A. Kalev and I.H. Deutsch, Quantum process tomography of unitary and near-unitary maps. *Phys. Rev. A* **90**, 012110 (2014).
- [30] A. I. Lvovsky, J. Mlynek, Quantum-Optical Catalysis: Generating Nonclassical States of Light by Means of Linear Optics. *Phys. Rev. Lett.* **88**, 25 (2002).
- [31] A. Anis and A. I. Lvovsky, Maximum-likelihood coherent-state quantum process tomography. *New J. Phys.* **14**, 105021 (2012).
- [32] J.S. Neergard-Nielsen, M. Takeuchi, K. Wakui, H. Takahashi, K. Hayasaka, M. Tateoka and M. Sasaki, Photon subtraction from traveling fields - recent experimental demonstrations. *Progress in Informatics* **8**, 5-18 (2011).
- [33] M. Halder, A. Beveratos, N. Gisin, V. Scarani, C. Simon and H. Zbinden, Entangling independent photons by time measurement. *Nat. Phys.* **3** 692-659 (2007).

- [34] M. Takeoka, S. Guha, M. Wilde, Fundamental rate-loss tradeoff for optical quantum key distribution. *Nat. Comm.* **5**, 5235 (2014).
- [35] S. Guha, H. Krovi, C.A. Fuchs, Z. Dutton, J.A. Slater, C. Simon, W. Tittel, Rate-loss analysis of an efficient quantum repeater architecture. *Phys. Rev. A* **92**, 022357 (2015).
- [36] R. Kumar, E. Barrios, C. Kupchak and A.I. Lvovsky, Experimental Characterization of Bosonic Creation and Annihilation Operators. *Phys. Rev. Lett.* **110**, 130403 (2013).
- [37] A.I. Lvovsky and M.G. Raymer, Continuous-variable optical quantum-state tomography. *Rev. Mod. Phys.* **81**, 299 (2009).
- [38] R. Kumar, E. Barrios, A. MacRae, E. Cairns, E.H. Huntington and A.I. Lvovsky, Versatile wideband balanced detector for quantum optical homodyne tomography. *Opt. Commun.* **285**, 5259 (2012).
- [39] H. Ollivier and W. H. Zurek, Quantum Discord: A Measure of the Quantumness of Correlations. *Phys. Rev. Lett.* **88** 017901 (2001).
- [40] S.L. Braunstein and P. van Loock, Quantum information with continuous variables. *Rev. Mod. Phys.* **77** (2005).
- [41] T. J. Bartley and I. A. Walmsley. Directly comparing entanglement-enhancing non-Gaussian operations. *New J. Phys.* **17**, 023038 (2015).
- [42] H.M. Chrzanowski, N. Walk, S.M. Assad, J. Janousek, S. Hosseini, T.C. Ralph, T. Symul and P. K. Lam, Measurement-based noiseless linear amplification for quantum communication. *Nat. Phot.* **8** (2014).
- [43] T. C. Ralph. Quantum error correction of continuous-variable states against Gaussian noise. *Phys. Rev. A* **84**, 022339 (2011).
- [44] J. Eisert, D. E. Browne, S. Scheel and M. B. Plenio. Distillation of continuous-variable entanglement with optical means. *Ann. Phys.* **311**, 431-458 (2004).
- [45] A. Datta, et al. Compact continuous-variable entanglement distillation. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 060502 (2012).

- [46] Z. Chen, Q. Wu, C. Zhang, Progressing of Quantum Tomography for Quantum Information Acquisition. *JEMAA* **2** 5, (2010).
- [47] K. Banaszek, M. Cramer and D. Gross, Focus on quantum tomography. *New J. Phys.* **15** 125020 (2013).
- [48] C. Monroe, Quantum information processing with atoms and photons. *Nature* **416**, 238 (2002)
- [49] T.B. Pittman, M.J. Fitch, B.C. Jacobs and J.D. Franson, Experimental controlled-NOT logic gate for single photons in the coincidence basis. *Phys. Rev. A* **68**, 032316 (2003).
- [50] A. Jamiokowski, Linear transformations which preserve trace and positive semidefiniteness of operators. *Rep. Math. Phys.* **3**, 275 (1972).
- [51] E.C.G. Sudarshan, Equivalence of Semiclassical and Quantum Mechanical Descriptions of Statistical Light Beams. *Phys. Rev. Lett.* **10**, 277 (1963).
- [52] C.K. Hong, Z.Y. Ou and L. Mandel, Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference. *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2044 (1987).