



Федеральное Государственное Бюджетное
Учреждение Науки Институт Общей Физики
им. А. М. Прохорова РАН



«Утверждаю»

Директор ИОФ РАН

академик И.А. Щербаков

«29» ноября 2017 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Белинского Леонида Владимировича

«Разработка методов и алгоритмов высокоточной томографии квантовых состояний»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 05.27.01 — «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Диссертация Л.В. Белинского посвящена разработке и анализу эффективных протоколов
прецизионных измерений для систем конечной размерности и квантовых состояний
электромагнитного поля. Основной целью работы является разработка и анализ новых
прецизионных протоколов квантовой томографии.

Актуальность темы исследования

Тема работы и ее цели безусловно актуальны, поскольку квантовая томография – это один из
важных элементов современных научных исследований и их практических приложений в
таких бурно развивающихся областях как квантовые вычисления и квантовых
коммуникации.

Основные научные результаты

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. В первой главе анализируются
протоколы восстановления чистых и смешанных трехфотонных состояний. Разработан
эффективный метод квантовой томографии, основанный на так называемом корневом
подходе, предложенном в 2004 г. Ю.И. Богдановым [18]. В качестве одного из примеров
рассмотрено перепутанное чистое состояние, имеющее вид суммы двух неперепутанных
состояний трех фотонов с горизонтальной поляризацией и трех фотонов с вертикальной
поляризацией (GHZ-состояние). Рассмотрено также смешанное состояние, являющееся
суперпозицией чистого GHZ- состояния с состоянием, описываемым единичной матрицей. В
обоих случаях продемонстрировано с очень хорошей точностью восстановление состояний,
получаемых в численном эксперименте. Отмечено также, что в ряде ранее опубликованных
работ других авторов [24; 58] методами квантовой томографии восстанавливались
параметры генерировавшихся экспериментально GHZ-состояний, при том, что точность
восстановления была заметно ниже получаемой в численных экспериментах по методике
диссертационной работы. По мнению автора диссертации, потеря точности в указанных
работах могла быть связана с «существенными погрешностями во время генерации,
измерения и обработки экспериментальных данных».

Вторая глава диссертации посвящена описанию методики разработки новых
высококачественных протоколов томографии конечно-мерных квантовых систем на основе
предложенной процедуры оптимизации. Оптимизация состоит в специальном выборе
векторов Стокса на сфере Пуанкаре-Блоха базисных состояний, на которые должно

проектироваться исследуемое состояние. Данный выбор делается на основе аналогии с задачей об определении распределения электронов на сфере, минимизирующем потенциальную энергию их взаимодействия. Как показано, в задачах о квантовой томографии подобная оптимизация обеспечивает наибольшую точность томографического восстановления квантовых состояний.

В третьей главе диссертации разработанные оптимизированные методы квантовой томографии применяются для описания и характеристики квантовых процессов с поляризационными состояниями фотонов, наблюдаемых экспериментально. Проанализировано, каким образом и в каких условиях необходимо учитывать различные аппаратные факторы, влияющие на выполняемые операции и связанные, например с частотными зависимостями поворотов поляризации фотонов в фазовых пластинках и тому подобными. Проанализировано явление поляризационного эха аналогичное хорошо известному спиновому эху в магнитном ядерном резонансе. Отмечено, что данный эффект может быть использован для повышения секретности в протоколах распределения ключа в квантовой криптографии.

В четвертой главе диссертации рассмотрено статистическое восстановление квантовых состояний на основе оптических квадратурных квантовых измерений с использованием корневого подхода. Разработаны методы, обеспечивающие существенно более высокую точность восстановления квантовых состояний по сравнению со стандартными подходами, что подтверждается результатами численных экспериментов. Разработан новый метод, направленный на создание адекватных статистических моделей оптических квантовых состояний с использованием технологии квадратурных измерений. Наконец, пятая глава диссертации посвящена исследованию фотонной статистики и квадратурному измерению условных квантовых состояний электромагнитного поля, возникающих при отщеплении от исходного пучка заданного числа фотонов. Выполнена математическая обработка результатов экспериментов по генерации и измерению тепловых квантовых состояний, а также условных квантовых состояний, возникающих при отщеплении от теплового состояния различного числа фотонов (от одного до десяти). Параметры распределений оценены методом максимального правдоподобия, и найдено, что точность восстановления каждого из приготовленных состояний составляет более чем 99 %.

Новизна полученных результатов

Полученные результаты весьма многочисленны их новизна не вызывает сомнений. Сформулированы новые методы оптимизации протоколов квантовой томографии и новые протоколы, отличающиеся большей прецизионностью чем известные. С помощью предложенной методики в деталях описан целый ряд экспериментов и квантовых преобразований, потенциально полезных для протоколов передачи квантового ключа, описан новый эффект поляризационного эха и т.д.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов и выводов определяется не только их высококачественным математическим обоснованием, но и многочисленными сравнениями с экспериментальными данными.

Практическая значимость диссертации

Результаты, полученные автором уже используются для постановки новых экспериментов и, вне всяких сомнений, найдут применение и во многих последующих исследованиях различных групп экспериментаторов, работающих в областях квантовых вычислений и квантовых коммуникаций.

Оформление диссертации

Объем и структура работы отвечают требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Текст диссертации написан грамотно и практически без ошибок.

Публикации

Основные результаты опубликованы в 6 статьях в журналах из списка ВАК и доложены на многих конференциях

Замечания

Одно из замечаний по диссертации является, в некотором смысле, прямым продолжением ее достоинств. Ввиду очень большого объема материала, вошедшего в диссертацию, в некоторых случаях это ведет к недостаточной ясности и понятности изложения. Так, например, вопросы возникают уже по одному из первых рисунков в первой главе, Рис. 1.3. На этих рисунках красные кривые – это теория, а столбики – численный расчет. Во-первых, численный расчет – это тоже теория, а не реальный эксперимент. А во-вторых, остается за гранью текста, как считались теоретические кривые распределения потерь точности.

Далее, непосредственно перед Рис. 1.1 на стр. 14 сказано, что состояние $|1_v, 2_H\rangle$ «будет описываться вектором в пространстве размерности 4». Вряд ли это верно, т.к. это состояние трехкубитное, и размерность соответствующего гильбертова пространства для трехкубитных состояний равна $2^3=8$.

Также вызывает удивление еще ряд замечаний о свойствах трехфотонных поляризационных состояний. Насчет состояния $(|3_H\rangle + |3_V\rangle)/\sqrt{2}$ на стр. 13 сказано, что оно максимально перепутано. Это верно, и не только потому, что оно максимально нарушает неравенства Белла, но и потому, что это состояние имеет вид разложения Шмидта с двумя совпадающими параметрами разложения равными $1/\sqrt{2}$. Но далее говорится, что «при детектировании одного из фотонов состояние остальных фотонов становится факторизуемым». По этому поводу, во-первых, крайне проблематична возможность отделить и протектировать один фотон из этого состояния. А во-вторых, если это как-то и было бы возможным сделать, то состояние оставшихся двух фотонов определялось бы редуцированной матрицей плотности 4×4 со всеми нулевыми элементами кроме двух диагональных, равных $1/\sqrt{2}$ каждый. Такое состояние является смешанным и не факторизуемо. Наконец, на стр. 14 говорится о том, что «во всех экспериментах трифотонны были разделены на три отдельных канала и в этом случае все три фотона различимы». Вообще-то фотоны – это всегда бозоны, и поэтому они всегда неразличимы. Если же есть иллюзия, что по каким-то признакам они различимы, то это только значит, что в такой ситуации у фотонов кроме поляризации есть еще одна степень свободы, например, по угловой переменной. Если такое состояние является чистым, то его волновая функция должна быть симметричной по всем степеням свободы, и это будут более сложные образования, чем $(|3_H\rangle + |3_V\rangle)/\sqrt{2}$ или упомянутое в диссертации состояние $|1_v, 2_H\rangle$, с размерностью гильбертова пространства, большей чем 8. Если же есть основания предполагать, что поляризационно-угловые состояния смешанные, то их нельзя описывать волновыми функциями или векторами состояний, но разумеется, свойства симметрии волновых функций еще более сложных состояний (например, 4-фотонных) должна найти свое отражение и в симметричном виде матрицы плотности смешанных трехфотонных состояний. Но все же создается впечатление, что несмотря на формулировки о различных фотонах, в диссертации реально рассматривается именно чистое поляризационное состояние $(|3_H\rangle + |3_V\rangle)/\sqrt{2}$.

Заключение

Сделанные замечания не меняют общей высоко положительной оценки диссертации, которая в целом производит очень хорошее впечатление. Автором получено много интересных и важных результатов. Диссертация Л.В. Белинского является законченной

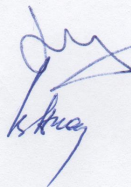
научно-квалификационной работой, новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание. Материалы диссертации могут быть использованы в организациях, занимающихся вопросами квантовых вычислений и квантовой информации, таких как Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, МФТИ, МИФИ, Казанский Физико-Технический Институт им. Завойского РАН и т.д.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Леонид Владимирович Белинский заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 — «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» за разработку и применение новых эффективных методов высоко прецизионной квантовой томографии.

Диссертация заслушана на семинаре по многофотонным процессам ИОФ РАН 25 октября 2017 г.

Проект отзыва заслушан и утвержден на заседании Ученого Совет Отдела Мощных Лазеров ИОФ РАН 15 ноября 2017 г., протокол № 84. .

Отзыв составил кандидат физ.-мат наук,
научный сотрудник теоретической лаборатории
Отдела Мощных Лазеров ИОФ РАН



Н.П. Полужтков

Заведующий Отделом Мощных лазеров ИОФ РАН
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.В. Аполлонов

Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт Общей Физики
им. А. М. Прхорова РАН

119991, ГСП-1, Москва, ул. Вавилова 38, Тел. +7 4995038432, E-mail: vapollo@kapella.gpi.ru

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

сотрудников Федерального Государственного Бюджетного Учреждения Науки
Институт Общей Физики им. А. М. Прохорова РАН по тематике защиты диссертации
Белинского Леониды Владимировича «Разработка методов и алгоритмов
высокоточной томографии квантовых состояний», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 —
«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» за последние 5 лет

1. M.V. Fedorov,
Biphoton quarks as either pure or mixed states, features and reconstruction from coincidence measurements
Eur. Phys. J. D, 67: 100 (2013).
2. M.V. Fedorov & N.I. Miklin
Schmidt modes and entanglement
Contemporary Physics, 55, 94 (2014)
3. M.V. Fedorov
Features of three-photon polarization states: Entanglement and polarization
International Journal of Quantum Information, 12, No. 07, 1560009 (2014)
DOI: 10.1142/S0219749915600096
4. M.V. Fedorov, N.I. Miklin
Three-photon polarization quarks: polarization, entanglement and Schmidt decompositions
Laser Physics, 25, N3, 035204 (2015)
5. M.V. Fedorov
Schmidt decomposition for non-collinear biphoton angular wave functions
Phys. Scr., 90, 074048 (2015)
6. N. A. Borshchevskaya, K. G. Katamadze, S. P. Kulik and M. V. Fedorov
Three-photon generation by means of third-order spontaneous parametric down-conversion in bulk crystals
Laser Phys. Lett., 12, 115404 (2015)
7. M.V. Fedorov
Azimuthal entanglement and multichannel Schmidt-type decomposition of noncollinear biphotons
Phys. Rev. A 93, 033830 (2016)
8. M.V. Fedorov, S.V. Vintskevich
Diverging light pulses in vacuum: Lorentz-invariant mass and mean propagation speed
Laser Physics, 27, 036202 (2017)
9. N. A. Borshchevskaya, K. G. Katamadze, S. P. Kulik, S. N. Klyamkin, S. V. Chuvikov, A. A. Sysolyatin, S. V. Tsvetkov, and M. V. Fedorov
Luminescence in germania-silica fibers in a 1–2 μm region
Opt. Lett., 15 2874 (2017)