

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ ДЕКОГЕРЕНЦИИ НА ИНТЕРФЕРЕНЦИЮ ХОНГ-У-МАНДЕЛА

Гусельников М. С.¹

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Козубов А. В.¹

¹Университет ИТМО

msguselnikov@itmo.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР №624084 «Современные проблемы фотоники».

Введение

Интерференция Хонг-У-Мандела (ХУМ), то есть интерференция двухфотонных состояний на сбалансированном светоделителе, имеет ключевое значение для квантовых технологий. Этот феномен широко используется при решении практических задач квантовой сенсорики, квантовых вычислений и квантовых коммуникаций [1]. В частности, интерференция ХУМ используется для различения белловских состояний в протоколах квантовой телепортации, которые сегодня активно используются при разработке квантовых повторителей. Свойства интерференции ХУМ в идеальных модельных условиях хорошо изучены. Однако в отличие от идеальных моделей во всякой реальной квантовой системе неизбежно возникают эффекты декогеренции (диссипация, межмодовое взаимодействие, термализация и др.), которые негативно сказываются на квантовых свойствах физической системы. На практике влияние эффектов декогеренции как правило учитывают феноменологически. Такой подход приемлем в некоторых частных случаях, однако лишен универсальности. В настоящей работе для аналитического описания влияния эффектов декогеренции на интерференцию ХУМ предлагается использовать альтернативный метод, основанный на использовании уравнения Линдблада. В качестве модельного примера, иллюстрирующего работоспособность данного метода, рассматривается интерференция кубитов и белловских состояний на сбалансированном светоделителе.

Основная часть

Существуют различные подходы к аналитическому описанию неунитарной динамики бозонных систем. Один из них основан на использовании общего кинетического уравнения типа Линдблада (Горини-Косаковского-Сударшана-Линдблада) [2]. Этот подход хорошо зарекомендовал себя, например, при описании диссипативной динамики поляризационных состояний в оптическом волокне [3].

При использовании уравнения Линдблада оказывается удобным перейти к супероператорному формализму, который за счет использования соответствующей алгебры супероператоров, существенно упрощает процесс аналитических расчетов. Данный подход был использован в настоящей работе для описания интерференции поляризационных кубитов и поляризационных белловских состояний на сбалансированном светоделителе.

Рассматриваемые двухфотонные состояния характеризуются двумя поляризационными и двумя пространственными модами, то есть описываются матрицей плотности размерностью 4 на 4. Однако до попадания на светоделитель фотоны распространяются в соответствующих пространственных модах независимо. Поэтому действие супероператора Лиувилля, генерирующего неунитарную динамику, рассмотрено независимо для каждой из пространственных мод с помощью супероператоров, характеризуемых матрицами коэффициентов 2 на 2.

Унитарное преобразование светоделителя смешивает две пространственные моды, поэтому соответствующий ему супероператор, как было показано, характеризуется матрицей 4 на 4 и является одним из генераторов алгебры супероператоров. Это позволило описать действие светоделителя на входное состояние в компактной форме за счет использования соответствующих коммутационных соотношений. Перед этим матрицы коэффициентов супероператоров, задающих состояние на входе в светоделитель, были соответствующим образом расширены до размерности 4 на 4.

В результате были получены аналитические выражения для вероятности детектирования нуля, одного и двух фотонов на выходе из светоделителя в случаях, когда на светоделителе интерферируют два произвольных кубита и произвольная суперпозиция белловских состояний. С помощью полученных выражений было произведено численное моделирование.

Выводы

В данной работе физико-математическая модель декогеренции бозонных систем, основанная на уравнении Линдблада, использована для описания интерференции ХУМ. С помощью данной модели получены выражения для вероятности срабатывания нуля, одного или двух детекторов после интерференции на светоделителе фоковских кубитов. Показано, что в случае, когда оба квантовых канала характеризуются одинаковыми параметрами декогеренции, основным эффектом, определяющим динамику вероятности фотоотсчетов, – это диссипация, которая со временем понижает вероятность регистрации ненулевого числа фотонов. В случае, когда параметры декогеренции для двух каналов различны, то становится заметным эффект межмодового взаимодействия: при изначальной неразличимости фотонов со временем возникает ненулевая вероятность зарегистрировать фотоны по отдельности. Также получены выражения для вероятности срабатывания нуля, одного или двух детекторов после интерференции на светоделителе максимально-запутанных белловских состояний. Показано, что вероятность успешного различения антисимметричного белловского состояния заметно уменьшается при наличии диссипации и межмодового взаимодействия хотя бы в одном из квантовых каналов.

Литература

1. Alodjants A. P. et al. Quantum optical metrology // *Usp. Fiz. Nauk.* 2024. Vol. 194. P. 711. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.01.039634>.
2. Gaidash A. et al. Lindblad dynamics of open multimode bosonic systems: Algebra of quadratic superoperators, exceptional points, and speed of evolution // *Physical Review A.* 2025. Vol. 111, no 6. P. 062211. <https://doi.org/10.1103/2lgr-34qp>.
3. Gaidash A. et al. Quantum dynamics of mixed polarization states: effects of environment-mediated intermode coupling // *Journal of the Optical Society of America B.* 2021. Vol. 38, no. 9. P. 2603-2611. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.425226>.