

Распространение макроскопической запутанности между узлами квантовой сети конденсатов Бозе — Эйнштейна

Илья Дмитриевич Лазарев^{1,2}, Алексей Н. Пырков¹

1. ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН
2. Факультет фундаментальной физико-химической инженерии МГУ имени М.В. Ломоносова

Распределение запутанности на большие расстояния является фундаментальной проблемой, необходимой для решения широкого круга задач, таких как квантовая связь, распределённые квантовые вычисления и квантовая метрология. В настоящее время схемы квантовых повторителей, как правило, ориентированы на распределение микроскопической запутанности, что эквивалентно запутанности одной пары Белла.

В нашей работе мы предлагаем схему распределения макроскопического количества запутанности на большие расстояния, в которой число операций масштабируется лишь линейно с длиной цепи в идеальном случае (при отсутствии декогеренции). Данная схема основана на использовании ансамблей кубитов и их запутывании посредством взаимодействия типа $S_z S_z$ [1], реализуемого с помощью ансамблей атомных газов, связанных общей оптической модой.

При выполнении исключительно локальных измерений на промежуточных ансамблях конденсаты Бозе-Эйнштейна, расположенные на концах цепи, оказываются запутанными. Мы демонстрируем существование особых «магических» времён взаимодействия, обеспечивающих распределение запутанности с идеальной точностью без деградации качества при увеличении длины цепи в идеальном случае без декогеренции.

Предложенная схема является детерминированной: при применении соответствующих локальных условных унитарных коррекций одно и то же запутанное состояние всегда может быть распределено с высокой точностью.

Основные каналы декогеренции, существенные для взаимодействия типа $S_z S_z$, включают спонтанное излучение, обусловленное использованием возбуждённых состояний, а также потерю фотонов в резонаторе и оптическом волокне. Эти эффекты качественно схожи с результатами, возникающими при воздействии разфазировки [2].

В данной работе мы провели численное моделирование нашего протокола с учётом разфазировки. Деградация запутанности остаётся умеренной при условии, что времена выполнения операций короче $1/\gamma$. Примечательно, что в «магические» моменты времени степень запутанности практически не изменяется при значениях γ менее 0.01. Это подтверждает возможность распределения макроскопической запутанности при использовании коротких времён взаимодействия [3].

1. Alexey N Pyrkov and Tim Byrnes Entanglement generation in quantum networks of Bose-Einstein condensates. New J. Phys. 15 093019 (2013).

2. Ebubechukwu O. Ilo-Okeke and Tim Byrnes Quantum nondemolition measurement operator with spontaneous emission. *Phys. Rev. A* 109, 063711 (2024).
3. A. N. Pyrkov, I. D. Lazarev, and T. Byrnes, Quantum Repeater Protocol for Deterministic Distribution of Macroscopic Entanglement. *Adv Quantum Technol.* 8, no. 8 (2025): 8, 2400524.
<https://doi.org/10.1002/qute.202400524>