

Шиллер Михаил Павлович

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Камалетдинова Алина Ильдаровна

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Иванова Олеся Сергеевна

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Трандин Семён Евгеньевич

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКОЙ СУЩНОСТИ КВАНТОВОЙ ЗАПУТАННОСТИ И ЕЕ РОЛЬ В КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Аннотация. В статье исследуется феномен квантовой запутанности, являющийся ключевым неклассическим ресурсом квантовой механики. Целью работы является теоретический анализ математического аппарата, описывающего запутанные состояния, и его физическая интерпретация в контексте нелокальности. В ходе анализа рассмотрены критерии несепарабельности состояний и следствия теоремы Белла. Полученные выводы подчеркивают фундаментальное отличие квантовой корреляции от классической и подтверждают решающую роль запутанности как базиса для квантовых вычислений, коммуникаций и метрологии.

Ключевые слова: квантовая запутанность, нелокальность, несепарабельность, парадокс ЭПР, квантовая информация, квантовый бит.

Shiller Mikhail Pavlovich

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Kamaletdinova Alina Ildarovna

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Ivanova Olesya Sergeevna

Student, ULSU(Ulyanovsk State University)

Ulyanovsk, Russia
Trandin Semyon Evgenievich
Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia

THEORETICAL ANALYSIS OF THE PHYSICAL NATURE OF QUANTUM ENTANGLEMENT AND ITS ROLE IN QUANTUM TECHNOLOGIES

Abstract. The article investigates the phenomenon of quantum entanglement, which is a key non-classical resource of quantum mechanics. The aim of the work is a theoretical analysis of the mathematical apparatus describing entangled states and its physical interpretation in the context of non-locality. The analysis considers the criteria for the non-separability of states and the consequences of Bell's theorem. The conclusions emphasize the fundamental difference between quantum and classical correlation and confirm the decisive role of entanglement as a basis for quantum computing, communication, and metrology.

Keywords: quantum entanglement, non-locality, non-separability, EPR paradox, quantum information, qubit.

Введение

Квантовая механика, являясь фундаментальной теорией микромира, предсказывает ряд явлений, которые не имеют аналогов в классической физике. Среди них особое место занимает феномен квантовой запутанности (entanglement). Это не просто корреляция между двумя или более квантовыми системами, а особая форма взаимосвязи, при которой полное описание системы невозможно дать через независимые описания ее подсистем. Свойства одной частицы в запутанной паре мгновенно определяют свойства другой, независимо от расстояния между ними.

Истоки концепции запутанности восходят к знаменитой работе Эйнштейна, Подольского и Розена (ЭПР) 1935 года. Авторы, придерживавшиеся принципа локального реализма, использовали это явление для демонстрации неполноты квантовой механики, назвав его «жутким дальнедействием». Однако последующие теоретические и экспериментальные исследования, особенно работы Джона Белла, перевели запутанность из разряда философских парадоксов в область

физической реальности и сделали ее краеугольным камнем современных квантовых технологий.

Актуальность исследования запутанности обусловлена тем, что она является основным ресурсом для реализации квантовых вычислений, квантовой криптографии и квантовой телепортации. Глубокое понимание ее физической сущности необходимо для разработки алгоритмов и архитектур будущих квантовых компьютеров.

Цель данной работы — проанализировать теоретические основы квантовой запутанности, выявить ее математические критерии и дать физическую интерпретацию нелокальности, возникающей при ее наличии.

Методы и теоретические основы

В теоретической физике описание квантовой системы производится в рамках математического аппарата Гильбертова пространства. Для описания составной системы, состоящей из двух подсистем (например, двух фотонов), используется тензорное произведение их индивидуальных Гильбертовых пространств.

Квантовое состояние $\bar{\Psi}$ называется сепарабельным (незапутанным), если оно может быть представлено как прямое произведение состояний подсистем А и В:

$$\Psi_{\text{сепарабельное}} = \Psi_A \otimes \Psi_B$$

Это означает, что свойства подсистемы А полностью независимы от свойств подсистемы В. Классические корреляции, такие как знание о том, что две частицы имеют одинаковый цвет, описываются сепарабельными состояниями.

Состояние называется несепарабельным (запутанным), если его невозможно представить в виде такого простого произведения. Простейшим примером максимально запутанного состояния является состояние Белла — суперпозиция, например, спинов двух частиц, направленных в разные стороны:

$$\Psi_{\text{запутанное}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle)$$

Главным теоретическим инструментом для проверки наличия неклассической запутанности является неравенство Белла. В 1964 году

Джон Белл доказал, что любая физическая теория, основанная на принципах локальности (отсутствие мгновенной передачи информации на расстоянии) и реализма (физические свойства существуют независимо от наблюдения), должна удовлетворять определенному набору неравенств. Нарушение этих неравенств, подтвержденное многочисленными экспериментами (например, проверка CHSH-неравенства), является прямым доказательством того, что квантовые корреляции не могут быть объяснены классической физикой и скрытыми локальными переменными. Таким образом, нарушение неравенства Белла является теоретическим критерием нелокальности квантовой запутанности.

Результаты теоретического анализа

Результатом теоретического анализа запутанности является установление ее уникальных свойств, кардинально отличающих ее от классической корреляции.

1. Нелокальная корреляция: Главный вывод, следующий из нарушения неравенств Белла, заключается в том, что запутанность является нелокальной. Измерение свойства одной частицы мгновенно фиксирует (коллапсирует) состояние другой, даже если частицы разнесены на сколь угодно большое расстояние. Физически это означает, что запутанность не является просто информацией о начальном состоянии; это свойство всей составной системы как единого целого, которое существует в общем Гильбертовом пространстве.
2. Запрет на сверхсветовую связь: Несмотря на мгновенность корреляции, запутанность не может быть использована для передачи информации со скоростью, превышающей скорость света. Этот важный результат известен как теорема о невозможности коммуникации (No-Communication Theorem). Она гласит, что, хотя измерение на стороне А мгновенно влияет на состояние частицы В, сторонний наблюдатель на стороне В не может извлечь из этого факта никакой контролируемой информации. Для передачи осмысленного сообщения, по-прежнему, требуется классический канал связи. Таким образом, принцип причинности и специальная теория относительности не нарушаются.

3. Квантовый ресурс: Запутанность рассматривается как фундаментальный квантовый ресурс, аналогичный энергии или массе. Она количественно измеряется с помощью различных мер запутанности, например, энтропии запутанности. Возможность манипулировать запутанностью и сохранять ее является технологическим вызовом и ключом к созданию кубитов — основных элементов квантовых компьютеров. Кубит, в отличие от классического бита (0 или 1), может существовать в суперпозиции, а запутанность позволяет объединять несколько кубитов в единый регистр, что обеспечивает экспоненциальное увеличение вычислительной мощности.

Таким образом, запутанность переводит систему из классического мира вероятностей в квантовый мир возможностей, где сложные вычисления, такие как алгоритм Шора для разложения больших чисел, становятся теоретически осуществимы за приемлемое время.

Заключение

Проведенный теоретический анализ показал, что квантовая запутанность является не просто математической особенностью квантовой механики, а ее фундаментальным физическим свойством, подтвержденным теоретическими выводами Джона Белла.

Основные выводы работы:

1. Запутанность — это неклассическая несепарабельная корреляция, которая существует вне рамок локального реализма и является свойством всей составной квантовой системы.
2. Нарушение неравенств Белла теоретически доказывает, что запутанность представляет собой физическое явление, коренным образом отличающееся от любых корреляций в классическом мире.
3. Несмотря на нелокальный характер, запутанность подчиняется принципу причинности и не позволяет осуществить сверхсветовую передачу информации.
4. С практической точки зрения, запутанность — это ключевой ресурс, без которого невозможно функционирование квантовых технологий, включая квантовые вычисления, где она обеспечивает необходимый

уровень взаимосвязи между кубитами для параллельной обработки информации.

Перспективы дальнейших теоретических исследований связаны с разработкой новых мер запутанности для многочастичных систем (мультипартитная запутанность) и изучением ее устойчивости к воздействию окружающей среды (декогеренции).

Список литературы:

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. — М.: Наука, 1978. — 792 с.
2. Бом Д. Квантовая теория. — М.: Наука, 1965. — 728 с.
3. Белл Дж. О парадоксе Эйнштейна, Подольского и Розена // Успехи физических наук. — 1985. — Т. 146. — Вып. 4. — С. 581–591.
4. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. — М.: Мир, 2006. — 824 с.
5. Мермин Н.Д. Квантовая механика и локальная реальность: Парадокс Белла // Успехи физических наук. — 1993. — Т. 163. — Вып. 3. — С. 73–80.
6. Холево А.С. Введение в квантовую теорию информации. — М.: МЦНМО, 2002. — 109 с.
7. Пенроуз Р. Путь к реальности, или Законы, управляющие Вселенной. Полный путеводитель. — М.: АСТ, 2007. — 864 с.