

## КВАНТОВАЯ ТЕЛЕПОРТАЦИЯ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

*Дубов Н.А., Каленик С.А.<sup>1</sup>, студенты гр. 443201*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Горячун Н. В. – старший преподаватель кафедры физики*

**Аннотация.** Рассматривается одно из ключевых направлений квантовой физики — квантовая телепортация. Описаны её фундаментальные принципы, основанные на явлениях квантовой суперпозиции и квантовой запутанности. Проанализированы перспективы практического применения квантовой телепортации в таких областях, как квантовая криптография, квантовые вычисления и построение квантовых сетей. Работа направлена на формирование целостного представления о потенциале квантовой телепортации в современных и будущих технологиях.

**Ключевые слова:** Квантовая механика, квантовая телепортация, квантовая запутанность, суперпозиция, частицы, кубит, состояние Белла.

Квантовая телепортация – это процесс передачи квантового состояния от одной частицы к другой без физического перемещения материальной частицы. В основе метода лежат уникальные свойства квантовой механики, такие как суперпозиция и квантовая запутанность. Эти фундаментальные принципы позволяют не только передавать информацию с высокой степенью защиты, но и закладывают основу для создания распределённых квантовых вычислительных систем и глобальных квантовых сетей.

Одно из ключевых понятий, на котором основана квантовая телепортация, является квантовая запутанность - явление, при котором две или более квантовых систем становятся связаны таким образом, что изменение состояния одной из них мгновенно влияет на состояние другой, независимо от расстояния между ними. Квантовая запутанность неразрывно связана с фундаментальными свойствами квантовой механики и парадоксом Эйнштейна — Подольского — Розена, в котором она была впервые описана.

Суть парадокса в том, что он противоречит соотношению неопределённостей Гейзенберга. Согласно этому соотношению, нет возможности одновременно точно измерить координату частицы и её импульс. Предполагая, что причиной неопределённости является то, что измерение одной величины вносит принципиально неустранимые возмущения в состояние и производит искажение значения другой величины, можно предложить гипотетический способ, которым соотношение неопределённостей можно обойти.

Допустим, две одинаковые частицы А и В образовались в результате распада третьей частицы С. В этом случае, по закону сохранения импульса, их суммарный импульс  $p_A + p_B$  должен быть равен исходному импульсу третьей частицы  $p_C$  то есть импульсы двух частиц должны быть связаны. Это даёт возможность измерить импульс одной частицы (А) и по закону сохранения импульса

$$p_B = p_C - p_A, \quad (1)$$

рассчитать импульс второй (В), не внося в её движение никаких возмущений. Теперь, измерив координату второй частицы, можно получить для этой частицы значения двух неизмеримых одновременно величин, что по законам квантовой механики невозможно. Исходя из этого, можно было бы заключить, что соотношение неопределённостей не является абсолютным, а законы квантовой механики являются неполными и должны быть в будущем уточнены.

Если же законы квантовой механики в данном случае не нарушаются, то измерение импульса одной частицы равносильно измерению импульса второй частицы. Однако это создаёт впечатление мгновенного воздействия первой частицы на вторую, превышая при этом скорость света, в противоречии с принципом причинности.

Квантовая телепортация и суперпозиция являются двумя ключевыми концепциями в квантовой механике, которые играют важную роль в понимании того, как происходит передача квантового состояния. Суперпозиция - это принцип, согласно которому квантовая система может находиться в нескольких состояниях одновременно. Например, кубит, который является основным элементом квантовых вычислений, может быть в состоянии  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$  или в их суперпозиции, записываемой как:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – комплексные числа, определяющие вероятность нахождения системы в каждом из состояний.

При измерении эта суперпозиция "коллапсирует" в одно из базовых состояний, что делает процесс передачи информации неповторимым и защищённым. Суперпозиция обеспечивает возможность существования квантовых состояний в нескольких формах одновременно, что является критически важным для успешной реализации квантовой телепортации.

Квантовая телепортация непосредственно использует состояния Белла. Состояния Белла представляют собой особый набор из четырёх квантовых состояний, описывающих систему из двух кубитов, находящихся в максимальной степени запутанности. В каждом из этих состояний два кубита не обладают определёнными индивидуальными состояниями до момента измерения. Вместо этого, система описывается общей волновой функцией, отражающей их неразрывную связь. Измерение одного из кубитов мгновенно определяет состояние другого, независимо от расстояния между ними, о чем было рассказано ранее. Это явление демонстрирует принцип суперпозиции, согласно которому квантовая система может находиться в комбинации нескольких состояний одновременно.

Квантовый канал — это механизм связи, который используется для передачи всей квантовой информации и является каналом, используемым для телепортации. Однако в дополнение к квантовому каналу для «сохранения» квантовой информации необходимо использовать традиционный канал, сопровождающий кубит. Когда проводится измерение изменений между исходным кубитом и запутанной частицей, результат измерения должен быть передан по традиционному каналу, чтобы квантовая информация могла быть восстановлена, а получатель мог получить исходную информацию. Из-за необходимости использования традиционного канала скорость телепортации не может превышать скорость света (следовательно, теорема о невозможности коммуникации не нарушается).

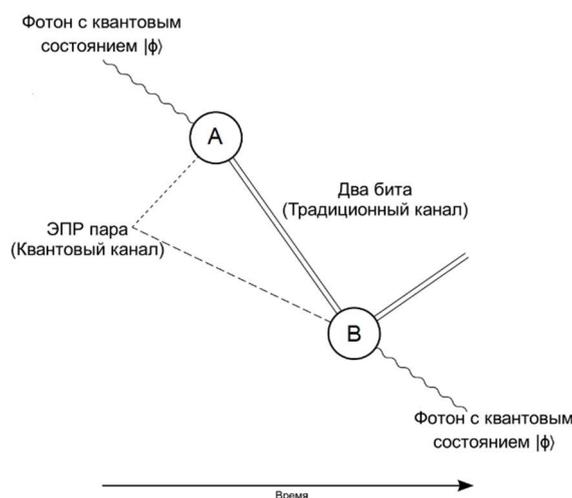


Рисунок 10 - Схема квантовой телепортации фотона

Для проведения квантовой телепортации необходимы такие ресурсы: канал связи, способный передавать два классических бита, средства генерации запутанного состояния Белла из кубитов и распределения по двум разным местоположениям, при этом выполняя измерения Белла на одном из кубитов с состоянием Белла и манипулируя квантовым состоянием другого кубита из пары. Также должен быть входной кубит (в квантовом состоянии  $|\phi\rangle$ ), который необходимо телепортировать. В этом случае протокол следующий:

1. Генерируется состояние Белла, когда один кубит отправляется в местоположение A, а другой - в местоположение B.
2. Измеряется состояния кубита Белла и кубита, подлежащего телепортации ( $|\phi\rangle$ ), в местоположении A. Это приводит к одному из четырех результатов измерения, которые могут быть закодированы в двух классических битах информации. Оба кубита в местоположении A затем отбрасываются.
3. Используя классический канал, два бита передаются из A в B.
4. В результате измерения, проведенного в точке A, кубит состояния Белла в точке B находится в одном из четырех возможных состояний. Из этих четырех возможных состояний одно идентично исходному квантовому состоянию  $|\phi\rangle$ , а три других тесно связаны. Идентификация фактически полученного состояния кодируется в двух классических битах и отправляется в местоположение B. Кубит состояния Белла в местоположении B затем модифицируется одним из трех способов или не модифицируется вообще, что приводит к созданию кубита, идентичного  $|\phi\rangle$ , состоянию кубита, который был выбран для телепортации.

Стоит отметить, что вышеупомянутый протокол предполагает, что кубиты могут быть адресованы индивидуально, что означает, что кубиты различимы и физически помечены. Однако могут возникнуть ситуации, когда два идентичных кубита неразличимы из-за пространственного перекрытия их волновых функций. При этом условия кубиты не могут управляться или измеряться по отдельности. Тем не менее, протокол телепортации, аналогичный описанному выше, все еще может быть (условно) реализован путем использования двух независимо подготовленных кубитов без необходимости в начальном состоянии Белла. Это можно сделать, обратившись к внутренним степеням свободы кубитов (например, спином или поляризации) с помощью пространственно-локализованных измерений, выполненных в разделенных областях А и В, где можно найти два пространственно перекрывающихся, неразличимых кубита. Затем это теоретическое предсказание было подтверждено экспериментально с помощью поляризованных фотонов в квантово-оптической установке.

Квантовая телепортация открывает множество перспектив для различных областей науки и технологий. Например, она позволяет передавать квантовые состояния, которые могут использоваться для генерации криптографических ключей. Некоторые протоколы основаны на использовании запутанных частиц для обмена ключами. Любая попытка перехвата приведет к изменению состояния, что сразу фиксируется отправителем и получателем, обеспечивая таким образом высокий уровень безопасности. Это распространяется также и на квантовый интернет - квантовая телепортация является ключевым элементом в построении квантового интернета, где информация может передаваться мгновенно и безопасно между различными узлами сети. Эксперименты по квантовой телепортации на сотни километров, а также спутниковые демонстрации показывают, что данная технология может быть также интегрирована в современные телекоммуникационные сети.

Квантовая телепортация позволит объединять ресурсы отдельных квантовых устройств, создавая распределенные квантовые вычислительные сети. Это может значительно ускорить решение сложных задач в разных научных областях.

Методы сверхплотного кодирования и интеграция квантовой телепортации в существующие телекоммуникационные сети могут привести к значительному увеличению пропускной способности каналов связи. Это особенно важно для передачи больших объемов данных и в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Несмотря на значительные достижения, квантовая телепортация сталкивается с рядом технических и фундаментальных проблем. Например, квантовые состояния крайне чувствительны к внешним воздействиям, что может привести к потере запутанности и информации. Также необходимо повысить точность и дальность передачи квантовых состояний, особенно в условиях реальных коммуникационных сетей.

Квантовая телепортация обладает огромным потенциалом для революционных изменений в области защищенной связи, распределенных вычислений и создания глобальных квантовых сетей. Ее применение в квантовой криптографии обеспечивает высокий уровень безопасности, а использование методов обмена запутанностью и сверхплотного кодирования открывает новые горизонты для квантовых коммуникаций. Кроме того, интеграция с современными радиочастотными технологиями позволяет расширить сферу применения данной технологии и создать основы для будущего квантового интернета.

**Список использованных источников:**

1. Телепортация: прыжок в невозможное / Дэвид Дарлинг. — Москва: Эксмо, 2008. — 300 с. — (Открытия, которые потрясли мир). — 3100 экз. — ISBN 978-5-699-23980-1.
2. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики. — М.-Л. : ГИТТЛ, 1949.
3. Кумар М. Квантовая реальность (глава 13) // Квант: Эйнштейн, Бор и великий спор о природе реальности. — М.: АСТ Corpus, 2015. — 592 с. — (Элементы). — ISBN 978-5-17-088555-8.
4. Кайе Ф., Лафлам Р., Моска М. Введение в квантовые вычисления. — Ижевск: РХД, 2009. — 360 с.
5. Квантовая криптография. Идеи и практика / Под ред. С. Я. Килина, Д. Б. Хорошко, А. П. Низовцева. — Минск: Белорусская наука, 2007. — ISBN 978-985-08-0899-8.
6. Riebe, M; Chwalla, M; Benhelm, J; Häffner, H; Hänsel, W; Roos, C F; Blatt, R (4 July 2007). "Quantum teleportation with atoms: quantum process tomography". *New Journal of Physics*. 9 (7): 211.

UDC 530.145

## QUANTUM TELEPORTATION: FUNDAMENTAL PRINCIPLES AND APPLICATION PROSPECTS

*Dubov N.A., Kalenik S.A.<sup>1</sup>*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*Goryachun N.V. – senior lecturer, department of physics*

**Annotation.** One of the key directions of quantum physics is considered — quantum teleportation. Its fundamental principles based on the phenomena of quantum superposition and quantum entanglement are described. The prospects of practical application of quantum teleportation in such fields as quantum cryptography, quantum computing and the construction of quantum networks are analyzed. The work is aimed at forming a holistic view of the potential of quantum teleportation in modern and future technologies.

**Keywords.** Quantum mechanics, quantum teleportation, quantum entanglement, superposition, particles, qubit, Bell state.