

**ПРИЧИННОСТЬ В КВАНТОВОЙ ТЕЛЕПОРТАЦИИ****Е.О. Киктенко<sup>1,2</sup>, С.М. Коротаев<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Троицк, Российская Федерация  
e-mail: evgeniy.kiktenko@gmail.com

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

*Квантовая телепортация представляет собой протокол передачи неизвестного квантового состояния между двумя сторонами (Алисой и Бобом). Этот протокол включает в себя два канала: квантовый (максимально запутанное состояние) и классический (стандартный канал передачи информации). Оказывается, что действие квантового канала сводится к передаче информации как вперед, так и обратно во времени. Это ведет к появлению феномена условного путешествия во времени, который был подтвержден экспериментально группой Лафореста в 2003 г. В настоящей работе исследованы обратно-временные процессы с позиции квантового причинного анализа, являющегося новым методом, дающим формальное определение и численную меру причинной связи в произвольной двусоставной системе. Рассмотрен модифицированный протокол телепортации без использования дополнительного классического канала. Вместо выполнения унитарной трансформации Боб просто проводит измерение над своей частицей. Момент измерения Боба был сдвинут во времени, затем наблюдалось изменение причинности между входным состоянием, результатом совместного измерения Алисы и выходным результатом Боба. Установлено, что результат Боба всегда является следствием по отношению к первым двум величинам, даже в случае, когда он был получен до момента приготовления входного состояния. Таким образом, получена обратно-временная причинность, но с причиной, содержащей абсолютно случайную переменную. Поэтому можно утверждать, что Боб получает сообщение из случайного будущего. Применение причинного анализа в рамках обратно-временного подхода к телепортации, вводящего собственное время отсчета для телепортирующегося кубита (отличного от отсчета времени внешнего наблюдателя), показывает, что в этой системе отсчета все следствия идут после соответствующих причин. Кроме демонстрации обратно-временной причинности, рассмотрена телепортация кубита, находящегося в причинной связи с другим кубитом. В результате показана возможность телепортации причинности.*

**Ключевые слова:** телепортация, кубит, запутанность, причинность.

**CAUSALITY IN QUANTUM TELEPORTATION****Е.О. Kiktenko<sup>1,2</sup>, S.M. Korotaev<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Geoelectromagnetic Research Centre of the Schmidt IPE RAS, Troitsk, Moscow, Russian Federation  
e-mail: evgeniy.kiktenko@gmail.com

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

*Quantum teleportation is a transfer protocol of unknown quantum state between two parties (Alice and Bob). This protocol includes two channels: quantum (maximum entangled state) and classic (standard communication channel). It turns out that the action of the quantum channel is solved to the transmission of information both*

*forward and back in time. This leads to an occurrence of the phenomenon of conditional time travel, which was confirmed experimentally by a group Laforest in 2003. In the present study reverse-temporal processes from the perspective of quantum causal analysis, which is a new method that gives a formal definition and numerical measure of a causal relationship in an arbitrary two-part system are investigated. It is considered the modified Protocol teleportation without using additional classical channel. Instead of performing a unitary transformation Bob just makes the measurement over his particle. Time of the measurement of Bob was shifted in time, and then a change of causality was observed between the input condition, the result of a joint measurement of Alice and output result of Bob. It is established that the Bob's result is always a consequence in relation to the first two values, even in case when it had been received till the making-ready moment of the input state. Thus, the reverse-temporal causality is received, but with the cause that contains absolutely random variable. Therefore, it can be argued that Bob receives a message from a random future. The use of causal analysis in the framework of the reverse-temporal approach to teleport what causes the introduction proper reading time for qubit during its teleportation (other than the reading time of the external observer), shows that in this reference frame all the effects are coming after the relevant causes. Besides demonstrating reverse-temporal causality, teleportation of a qubit being in a causal relationship with other qubit is considered. As a result the possibility teleportation of causality is showed.*

**Keywords:** teleport, qubit, confusion, causality.

**Введение.** Протокол, который позволяет передавать неизвестное квантовое состояние между двумя пространственно разделенными сторонами (обычно называемых Алисой и Бобом) без непосредственного перемещения каких-либо квантовых носителей — это квантовая телепортация [1]. Для выполнения этой операции Алиса и Боб должны обладать парой максимально запутанных частиц. С момента своего открытия запутанность привлекает к себе внимание кажущимся нарушением принципа относительности. В случае с телепортацией относительность не нарушается, так как Алисе и Бобу обязательно требуется классический канал для успешного завершения протокола. Тем не менее квантовая информация должна передаваться через квантовый канал, которым является запутанное состояние. Это утверждение подразумевает существование сигналов в обратном времени, которые были рассмотрены в работе [2] и экспериментально проверены в работе [3].

В настоящей статье рассмотрен вопрос о причинности в квантовой телепортации. Использован квантовый причинный анализ [4, 5] — новый метод, предлагающий формальные определения для терминов “причина” и “следствие”, а также численную меру силы причинной связи. Он помогает обосновать применение обратно-временного подхода к описанию телепортации и раскрывает особенности передачи сигналов через обратное время. Рассмотрена также телепортация кубита, находящегося в причинной взаимосвязи с другим кубитом. В результате раскрыта возможность “телепортации причинности”.

**Общая схема квантовой телепортации.** Во-первых, рассмотрим общую идею квантовой телепортации. Предположим, что существуют две пространственно разделенные стороны — Алиса и Боб. Одна сторона (Алиса) владеет частицей  $A$  в некотором квантовом состоянии  $|\psi\rangle$  и хочет передать это состояние (но не частицу) другой стороне (Бобу). Квантовая телепортация представляет собой протокол, который позволяет Бобу получить это состояние на своей частице  $B$ . В соответствии с теоремой о запрете клонирования во время телепортации частица  $A$  теряет свое состояние. Таким образом, квантовая телепортация — это процесс передачи квантового состояния из одного места в другое без перемещения квантовых носителей.

Рассмотрим простейший вариант квантовой телепортации, в котором телепортирующееся состояние является кубитом, т.е. когерентной суперпозицией двух ортогональных состояний  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ . Это может быть, например, поляризационная степень свободы фотона. Из соображений удобства будем использовать измененные обозначения для векторов белловского базиса:

$$|\Phi^+\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) \equiv |\Psi_1\rangle;$$

$$|\Phi^-\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle - |11\rangle) \equiv |\Psi_2\rangle;$$

$$|\Psi^+\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle) \equiv |\Psi_3\rangle;$$

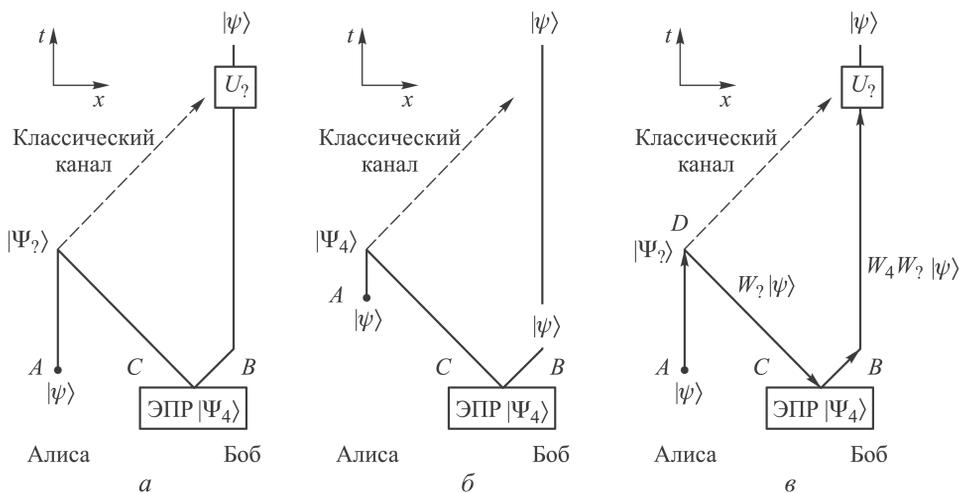
$$|\Psi^-\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle - |10\rangle) \equiv |\Psi_4\rangle.$$

Изначально Алиса владеет частицей  $A$  в состоянии  $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  ( $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ ). Телепортация основывается на использовании максимально запутанного двухкубитного состояния, например,  $|\Psi_4\rangle$ . Одна из частиц запутанной пары отдается Алисе ( $C$ ), а другая ( $B$ ) — Бобу (рис. 1, *a*).

На первом шаге Алиса проводит совместное измерение частиц  $A$  и  $C$  и получает некоторое состояние из белловского базиса  $|\Psi_i\rangle$ . Вопросительный знак обозначает то, что результат измерения абсолютно случаен. Измерение Алисы приводит к коллапсу в соответствии с тождеством

$$\begin{aligned} (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \otimes |\Psi_4\rangle &= \frac{1}{4} (|\Psi_1\rangle \otimes (\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) + |\Psi_2\rangle \otimes \\ &\otimes (\beta|0\rangle + \alpha|1\rangle) + |\Psi_3\rangle \otimes (\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) - |\Psi_4\rangle \otimes (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)). \end{aligned}$$

Частица  $B$  переходит в одно из четырех состояний в зависимости от того, какой результат получила Алиса. Чтобы получить состояние



**Рис. 1. Общая схема квантовой телепортации (а), схемы условного путешествия во времени (б) и обратно-временного подхода к квантовой телепортации (в)**

$|\psi\rangle$  Бобу необходимо провести трансформацию над своей частицей, но какую именно – может сказать лишь Алиса. Она посылает результат своего измерения (число от 1 до 4, т.е. два бита классической информации) по классическому каналу связи. Боб применяет требуемую трансформацию  $U$  и получает свою частицу  $B$  в требуемом состоянии  $U$ . На схеме, приведенной на рис. 1, а, вновь использован вопросительный знак, чтобы подчеркнуть, что такая трансформация зависит от результата измерения Алисы.

**Условное путешествие во времени и обратно-временной подход.** Квантовая телепортация обладает одной интересной особенностью, называющейся условным путешествием во времени. Если Алиса получает в результате своего измерения такое же состояние, в каком изначально находилась пара  $CB$  (в этом случае  $|\Psi_4\rangle$ ), то трансформация Боба будет соответствовать единичной матрице. Это означает, что частица Боба уже находится в требуемом состоянии (рис. 1, б). Возникает вопрос, с какого момента частица Боба находится в требуемом состоянии. С позиции стандартного математического подхода кажется, что частица Боба коллапсирует в требуемое состояние в момент измерения Алисы. Однако в этом случае возникает противоречие с принципом относительности. Последним вариантом является момент рождения ЭПР-пары. Действительно, если поместить измеряющее устройство где-либо на временной линии частицы  $B$ , то результирующая статистика будет такой, как будто измерялось состояние  $|\psi\rangle$ , но только тогда, когда Алиса получит правильный результат в своем измерении. Именно поэтому этот феномен носит название *условное путешествие во времени*.

В работе [3] развивается альтернативное теоретическое описание процессов в квантовой телепортации. Запутанная пара рассматривается как канал, через который распространяется кубит  $|\psi\rangle$  (рис. 1, в). Каждое измерение в базисе максимально запутанных состояний и создание запутанного состояния рассматривается как “зеркало во времени”, которое меняет направление распространения кубита во времени, проводит комплексное сопряжение и унитарную трансформацию в соответствии с конкретным запутанным состоянием

$$(W_i)_{a,b} = \sqrt{2} \langle b, a | \Psi_i \rangle.$$

Таким образом, после белловского измерения Алисой кубит  $|\psi\rangle$  подвергается случайной (одной из четырех) трансформации в зависимости от конкретного результата Алисы. Далее он перемещается обратно во времени и трансформируется еще раз, но на этот раз трансформация фиксирована. Затем он двигает вперед во времени вплоть до унитарного преобразования Боба, которое оказывается в точности обратным по отношению ко всем предыдущим трансформациям:  $U_? = (W_4^\dagger W_?)^{-1} = W_?^\dagger W_4$ . Этот обратно-временной подход полностью соответствует стандартному подходу, использующему тензорное произведение, но его основной особенностью является то, что он дает интуитивно понятный способ объяснения феномена условного путешествия во времени.

Рассмотрим вопрос о причинности, который возникает в контексте применения обратно-временного подхода.

**Суть квантового причинного анализа.** Стандартный подход к причинности предполагает лишь запаздывание следствия по отношению к причине. Однако запаздывание является необходимым, но не достаточным условием для существования причинной связи. Кроме того, в реальных ситуациях обычно можно отделить причину от следствия без измерения запаздывания. Этот факт свидетельствует о том, что существует некоторая фундаментальная асимметрия между причиной и следствием.

Рассмотрим основные принципы квантового причинного анализа [4–6]. Пусть имеется двусоставная квантовая система  $AB$ , которая определена с помощью матриц плотности  $\rho_{AB}$ ,  $\rho_A = \text{Tr}_B \rho_{AB}$  и  $\rho_B = \text{Tr}_A \rho_{AB}$ . Можно использовать безусловную ( $S(X) = -\text{Tr}[\rho_X \log_2 \rho_X]$ ) и условную ( $S(X|Y) = S(XY) - S(Y)$ ) фоннеймановские энтропии и ввести пару так называемых функций независимости

$$i_{A|B} = \frac{S(A|B)}{S(A)}; \quad i_{B|A} = \frac{S(B|A)}{S(B)}, \quad -1 \leq i \leq 1,$$

которые характеризуют влияние  $A$  на  $B$  и  $B$  на  $A$ .

Причинная связь между  $A$  и  $B$  соответствует неравенству  $i_{A|B} \neq i_{B|A}$ . С использованием теоремы Шеннона о максимальной скорости передачи информации между  $A$  и  $B$  можно получить минимальные времена для передачи информации от  $A$  к  $B$  и от  $B$  к  $A$ . Оказывается, что в течение любого периода времени следствие получает от причины больше информации, чем причина получает от следствия. В итоге вводим скорость необратимого потока информации  $c_2$  (обозначение соответствует обозначению, принятому в работе [7], где изначально, но в менее строгих терминах, вводился псевдоскалаляр хода времени с похожим смыслом):

$$C_2(A, B) = k \frac{(1 - i_{A|B})(1 - i_{B|A})}{i_{A|B} - i_{B|A}}, \quad k = 1. \quad (1)$$

Вводим формальное определение причинной связи:  $A$  — причина, а  $B$  — следствие, если  $c_2(A, B) > 0$ . Отсутствие причинной связи соответствует  $i_{A|B} = i_{B|A}$  и  $|c_2(A, B)| \rightarrow \infty$ , таким образом, чем меньше  $|c_2(A, B)|$ , тем асимметричнее система.

Основная особенность причинного анализа заключается в том, что в нем не используется запаздывание для определения причинности. Для классических переменных оно может быть введено как аксиома:

$$\begin{aligned} c_2(A, B) > 0 &\Rightarrow \tau_{A \rightarrow B} > 0; \\ c_2(A, B) < 0 &\Rightarrow \tau_{A \rightarrow B} < 0; \\ c_2(A, B) \rightarrow \infty &\Rightarrow \tau_{A \rightarrow B} \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\tau_{A \rightarrow B}$  — запаздывание между реализациями  $A$  и  $B$ .

Дж. Крэмер впервые разделил принципы сильной и слабой причинности [8]. Сильная (локальная) причинность соответствует обычному условию запаздывания следствия по отношению к причине, описываемому выражением (2). Без этой аксиомы имеем дело со слабой причинностью, которая соответствует лишь нелокальным корреляциям и подразумевает возможность передачи информации в обратном времени. Будем использовать нарушение выражения (2) в квантовой телепортации для обнаружения подобных сигналов и увидим, что они могут переносить лишь случайную информацию (таким образом, существование “телеграфа в прошлое” по-прежнему под запретом).

Величина  $c_2$  обладает интересным свойством, наглядно демонстрирующим свой смысл. Рассмотрим множество систем  $A, B, C, D, E$  (рис. 2), которые каким-то образом взаимодействуют друг с другом.

Для любой пары систем  $X$  и  $Y$  можно ввести величину взаимной информации  $I(X, Y) = S(X) + S(Y) - S(XY)$  как меру общей корреляции между ними. Величина взаимной информации симметрична

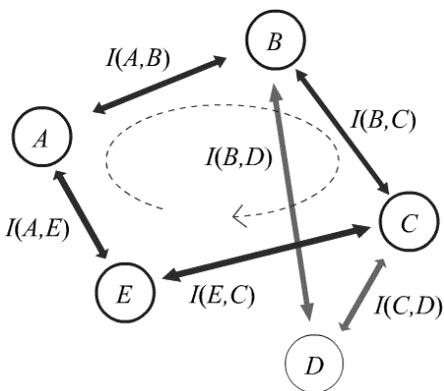


Рис. 2. Демонстрация циклического свойства  $c_2$

контура и рассчитать сумму всех величин взаимной информации, разделенных на соответствующие значения  $c_2$ , то получим ноль. Например, для контура  $A-B-C-E$  (см. рис. 2) имеем  $\frac{I(A,B)}{c_2(A,B)} + \frac{I(B,C)}{c_2(B,C)} + \frac{I(C,E)}{c_2(C,E)} + \frac{I(E,A)}{c_2(E,A)} = 0$ . Можно интерпретировать это тождество как запрет на существование замкнутых причинных контуров.

**Применение причинного анализа к телепортации.** Теперь можно рассмотреть применение причинного анализа к телепортации. В первую очередь рассмотрим подход, использующий тензорные произведения. С его позиции телепортация происходит в момент белловского измерения. Рассмотрим две конфигурации эксперимента. В случае, приведенном на рис. 3, а, Боб измеряет свою частицу  $B$  до момента измерения Алисы. С позиции тензорного подхода он просто получает некоторый случайный результат. В случае, представленном рис. 3, б, Боб измеряет свою частицу после измерения, выполненного Алисой, и следовательно, получает некоторый зашифрованный вариант входного состояния Алисы.

Введем два варианта входного сигнала:  $I$  — это чистое состояние  $|0\rangle$ ;  $II$  — максимально смешанное состояние  $\frac{1}{2}|0\rangle\langle 0| + \frac{1}{2}|1\rangle\langle 1|$ . Итак, получаем четыре различных конфигурации  $aI$ ,  $aII$ ,  $bI$  и  $bII$ .

Для выявления поведения причинности запишем матрицу плотности для полной системы  $ACB$  в виде функции параметра  $p$ . При  $p = 0$  будем иметь системы в момент перед белловским измерением,  $p = 1$  будет соответствовать моменту сразу после белловского измерения. В результате получим четыре матрицы плотности во время белловского

в том смысле, что  $I(X, Y) = I(Y, X)$ . Однако мера причинности антисимметрична:  $c_2(X, Y) = -c_2(Y, X)$ .

Кроме того, можно показать, что выражение (1) может быть переписано в виде

$$c_2(X, Y) = \frac{I(X, Y)}{S(X) - S(Y)}.$$

Тогда, если выбрать некоторый замкнутый контур, который соединяет некоторое подмножество этих систем, направление обхода этого

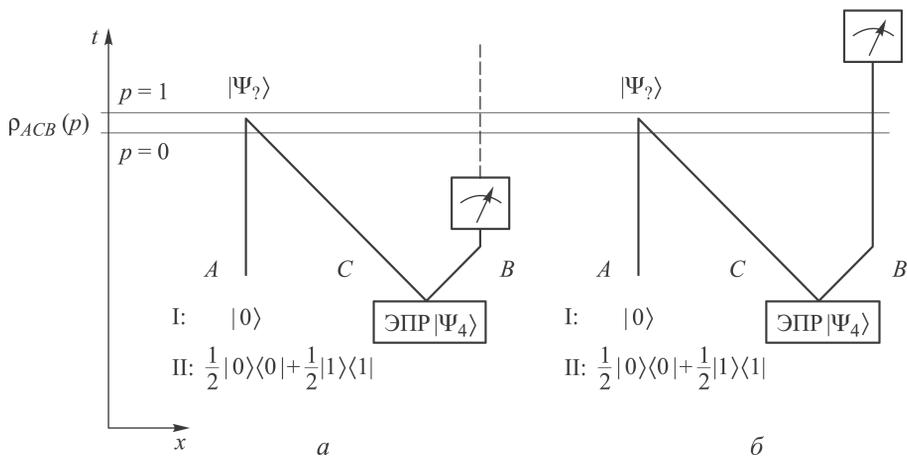


Рис. 3. Две конфигурации эксперимента, при котором Боб измеряет свою частицу  $B$  до измерения Алисы ( $a$ ) и Боб измеряет свою частицу  $B$  после измерения Алисы ( $б$ )

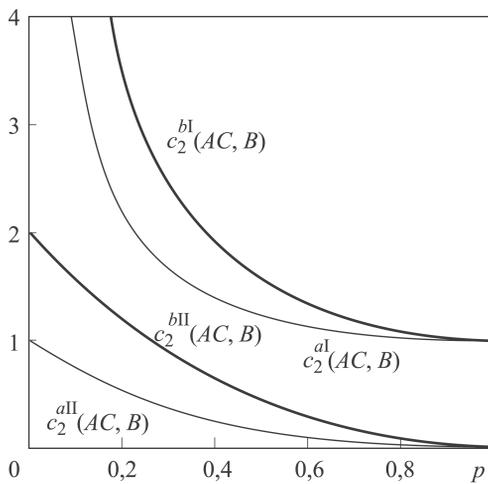
измерения Алисой:

$$\begin{aligned} \rho_{ACB}^{aI} &= \rho_{ACB}^{I,out} + (1-p) \left( \rho_{ACB}^{I,in,mesB} - \rho_{ACB}^{I,out} \right); \\ \rho_{ACB}^{bI} &= \rho_{ACB}^{I,out} + (1-p) \left( \rho_{ACB}^{I,in} - \rho_{ACB}^{I,out} \right); \\ \rho_{ACB}^{aII} &= \rho_{ACB}^{II,out} + (1-p) \left( \rho_{ACB}^{II,in,mesB} - \rho_{ACB}^{II,out} \right); \\ \rho_{ACB}^{bII} &= \rho_{ACB}^{II,out} + (1-p) \left( \rho_{ACB}^{II,in} - \rho_{ACB}^{II,out} \right), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \rho_{ACB}^{I,in} &= |0\rangle\langle 0| \otimes |\Psi_4\rangle\langle \Psi_4|; \\ \rho_{ACB}^{I,in,mesB} &= \frac{1}{2} |0\rangle\langle 0| \otimes (|01\rangle\langle 01| + |10\rangle\langle 10|); \\ \rho_{ACB}^{I,out} &= \frac{1}{4} (|\Psi_1\rangle\langle \Psi_1| + |\Psi_2\rangle\langle \Psi_2|) \otimes |1\rangle\langle 1| + \\ &\quad + \frac{1}{4} (|\Psi_3\rangle\langle \Psi_3| + |\Psi_4\rangle\langle \Psi_4|) \otimes |0\rangle\langle 0|; \\ \rho_{ACB}^{II,in} &= \frac{1}{2} (|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|) \otimes |\Psi_4\rangle\langle \Psi_4|; \\ \rho_{ACB}^{II,in,mesB} &= \frac{1}{4} (|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|) \otimes (|01\rangle\langle 01| + |10\rangle\langle 10|); \\ \rho_{ACB}^{II,out} &= \frac{1}{8} (|\Psi_1\rangle\langle \Psi_1| + |\Psi_2\rangle\langle \Psi_2| + |\Psi_3\rangle\langle \Psi_3| + |\Psi_4\rangle\langle \Psi_4|) \otimes (|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|). \end{aligned}$$

Причинность в звене  $AC, B$  для всех ситуаций представлена на рис. 4. Причинность всегда усиливается с ростом параметра  $p$  и главной особенностью является то, что для всех четырех конфигураций  $c_2(AC, B) > 0$  при  $0 < p < 1$ . Это весьма нетривиальный результат для случаев  $aI$  и  $aII$ , в которых Боб выполняет свое измерение до



**Рис. 4.** Поведение причинностей в звене  $AC, B$  при различных конфигурациях эксперимента

Алисы. Таким образом, с формальной позиции причинного анализа возможно получить ситуацию, когда причина идет за следствием.

Рассмотрим те же четыре случая с позиции обратно-временного подхода. Введем новый объект, который обозначим буквой  $D$ , являющийся результатом белловского измерения  $A$  и  $C$ . Кроме того, согласно обратно-временному подходу не существует различий конфигураций  $a$  и  $b$ . В конечном счете можно записать две “матрицы плотности” для вариантов I и II (верхний индекс “tr” указывает на использование обратно-временного формализма)

$$\begin{aligned} \rho_{ACBD}^{I, \text{tr}} &= \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \left| 0, W_j 0, W_4^\dagger W_j 0, \Psi_j \right\rangle \left\langle 0, W_j 0, W_4^\dagger W_j 0, \Psi_j \right|; \\ \rho_{ACBD}^{II, \text{tr}} &= \frac{1}{8} \sum_{i=0,1} \sum_{j=1}^4 \left| i, W_j i, W_4^\dagger W_j i, \Psi_j \right\rangle \left\langle i, W_j i, W_4^\dagger W_j i, \Psi_j \right|. \end{aligned} \quad (3)$$

Для состояний (3) имеем следующие результаты:  $\left| c_2^{I, \text{tr}}(AC, B) \right| = \infty$ ,  $c_2^{I, \text{tr}}(D, B) = 1$  — эти значения соответствуют случаям  $aI$  и  $bI$  при  $p = 0$  и  $p = 1$ ;  $c_2^{II, \text{tr}}(AC, B) = 1$ ,  $c_2^{II, \text{tr}}(D, B) = 0$  — эти значения соответствуют случаям  $aII$  при  $p = 0$ , а также  $aII$  и  $bII$  при  $p = 1$  (см. рис. 3). Отметим, что получили  $c_2^{bII}(AC, B) = 2$  при  $p = 0$ , так как  $S(CB) = 0$ . В случае обратно-временного подхода всегда  $S(CB) = 1$ , поскольку состояние “знает”, что оно будет измерено.

В рамках обратно-временного подхода можно рассмотреть два новых звена:  $AD, C$  и  $AD, B$ . Из (3) находим  $c_2^{I, \text{tr}}(AD, C) = c_2^{I, \text{tr}}(AD, B) = 1$  и  $c_2^{II, \text{tr}}(AD, C) = c_2^{II, \text{tr}}(AD, B) = 1/2$ . Эти значения описывают распространение кубита через обратное время, т.е. в обратно-

временном подходе все следствия идут за соответствующими причинами (в соответствии с причинным анализом).

Итак, можно воссоздать полную картину причинных связей в квантовой телепортации. Запутанная пара  $CB$  является носителем двух сигналов: входного состояния  $A$  и абсолютно случайного результата белловского измерения  $D$ . Унитарная трансформация  $U$  убирает влияние случайной переменной  $D$  из состояния  $B$  и Боб получает исходное состояние  $A$ . Наиболее интересный момент — измеряя свою частицу  $B$  Боб не просто получает некоторый случайный результат, эта случайность приходит через обратное время. Если искусственно убрать случайность из переменной  $D$  с помощью постселекции, то автоматически получится условное путешествие во времени.

**Телепортация причинных состояний.** Интересной модификацией квантовой телепортации является *обмен запутанностью* [9, 10]. Фактически этот протокол представляет собой телепортацию кубита, запутанного с другим кубитом. Схема обмена запутанностью между парами  $A-C$  и  $A-B$  за счет телепортации  $C$  на  $B$  показана рис. 5, *a*.

Обмен запутанностью — частный случай более общей ситуации, когда  $AC$  соответствует произвольной матрице  $\rho$ . После тех же операций получаем состояние  $AB$  в начальном состоянии  $AC$ . Однако состояние  $\rho$  может быть причинным с позиции информационной асимметрии. Например,  $A$  может быть причиной для  $C$ , или наоборот (рис. 5, *б*).

В подобных ситуациях получаем телепортацию причинности — интересное явление, которое может иметь место в квантовом мире. Отметим, что телепортация причинности, как и стандартная квантовая телепортация ограничена скоростью света.

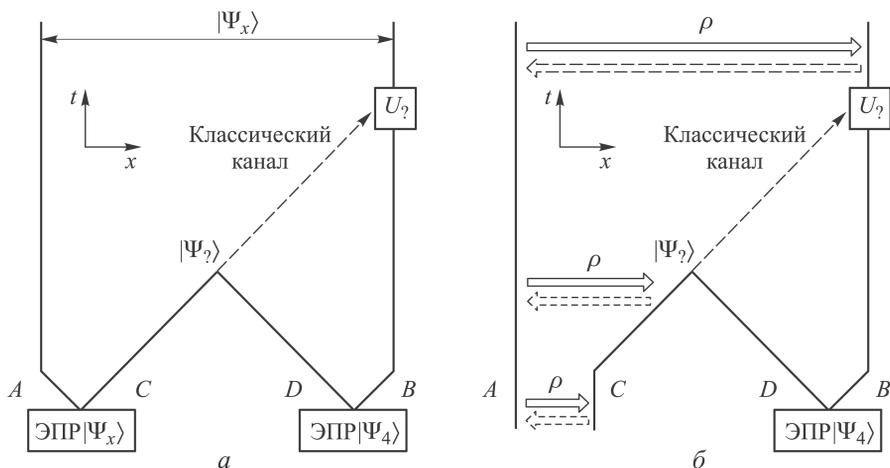


Рис. 5. Схемы по обмену запутанностью (а) и по телепортации причинности (б)

**Заключение.** Рассмотрены различные подходы к квантовой телепортации с помощью квантового причинного анализа. Перечислим основные следствия.

1. Причинный анализ обосновывает применение обратно-временного подхода к телепортации, так как именно в рамках этого подхода все следствия идут за соответствующими причинами.
2. Обратное время появляется как присущее свойство квантовой запутанности и позволяет получать информацию из случайного будущего.
3. Причинный анализ показывает, что условное путешествие во времени — частный случай общего явления передачи сигнала через обратное время.
4. Квантовая телепортация подразумевает возможность телепортации причинности, ограниченной скоростью света.

Рассмотренные особенности обратно-временного подхода потенциально помогают объяснить экспериментальные результаты, связанные с макроскопической запутанностью [11].

*Работа была выполнена при поддержке РФФИ (гранты 12-05-00001 и 12-05-98009) и Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант СП-961.2013.5).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Teleporting an unknown quantum state via dual classical and einstein-podolsky-rosen channels* / C.H. Bennett, G. Brassard, C. Crepeau, R. Jozsa, A. Peres, W.K. Wootters // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 70. P. 1895–1899 [Электронный ресурс] URL: <http://www.comp.nus.edu.sg/rahul/allfiles/teleport.pdf> (дата обращения: 17.12.2013).
2. *Penrose R.* Quantum computation, entanglement and state reduction // *Roy. Soc. of London Phil. Tr. A.* 1998. Vol. 356. Iss. 1743. P. 1927. DOI: 10.1098/rsta.1998.0256.
3. *Laforest M., Baugh J., Laflamme R.* Time-reversal formalism applied to maximal bipartite entanglement: theoretical and experimental exploration // *Phys. Rev. A.* 2006. Vol. 73. P. 032323.
4. *Kiktenko E.O., Korotaev S.M.* Causal analysis of asymmetric entangled states under decoherence // *Phys. Lett. A.* 2012. Vol. 376. P. 820–823. DOI: 10.1016/j.physleta.2012.01.032.
5. *Korotaev S.M., Kiktenko E.O.* Causality and decoherence in the asymmetric states // *Physica Scripta.* 2012. Vol. 85. I. 5. P. 055006. DOI:10.1088/0031-8949/85/05/055006.
6. *Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Sorokin M.O.* Effect of macroscopic nonlocality on geomagnetic and solar-ionospheric processes // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2000. Vol. 40. P. 323–330.
7. *Kozyrev N.A., Nasonov V.V.* On Some Properties of Time Revealed by Astronomy Observations: Manifestation of Cosmic Factors on the Earth and Stars; ed. by A.A. Efimov. M.: VAGO Press, 1978. P. 168–179 (in Russ.).
8. *Cramer J.G.* Generalized absorber theory and Einstein–Podolsky–Rosen paradox // *Phys. Rev. D.* 1980. Vol. 22. P. 362–376.

9. *Photons That Never Interacted* / J.-W. Pan, D. Bouwmester, H. Weinfurter, A. Zeilinger // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 80. P. 3891.
10. *Experimental delayed-choice entanglement swapping* / X.-S. Ma, S. Zotter, J. Kofler, R. Ursin, T. Jennewien, B. Brukner, A. Zeilinger // *Nature Physics*. 2012. Vol. 8. P. 479–485.
11. Korotaev S.M., Serdyuk V.O. The forecast of fluctuating large-scale natural processes and macroscopic correlations effect // *Int. J. of Computing Anticipatory Systems*. 2008. Vol. 20. P. 31–46.

## REFERENCES

- [1] Bennett C.H., Brassard G., Crepeau C., Jozsa R., Peres A., Wootters W.K. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, vol. 70, pp. 1895–1899. DOI: dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.1895
- [2] Penrose R. Quantum computation, entanglement and state reduction. *Roy. Soc. of London Phil. Tr. A*, 1998, vol. 356, no. 1743. pp. 1927–1939. DOI: 10.1098/rsta.1998.0256
- [3] Laforest M., Baugh J., Laflamme R. Time-reversal formalism applied to bipartite entanglement: theoretical and experimental exploration. *Phys. Rev. A*, 2006, vol. 73, pp. 032323-1-9. DOI: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.73.032323
- [4] Kiktenko E.O., Korotaev S.M. Causal analysis of asymmetric entangled states under decoherence. *Phys. Lett. A*, 2012, vol. 376, no. 6–7, pp. 820–823. DOI: 10.1016/j.physleta.2012.01.032
- [5] Korotaev S.M., Kiktenko E.O. Causality and decoherence in the asymmetric states. *Phys. Scr.*, 2012, vol. 85, no. 5, p. 055006. DOI:10.1088/0031-8949/85/05/055006
- [6] Korotaev S.M., Serdyuk V.O., Sorokin M.O. Effect of macroscopic nonlocality on geomagnetic and solar-ionospheric processes. *Geomagn. Aeron.* [Geomagn. Aeron., pp. 223–330], 2000, vol. 40, no. 3, pp. 56–64 (in Russ.).
- [7] Kozyrev N.A., Nasonov V.V. On some properties of time revealed by astronomy observations. *Sb. "Proyavlenie kosmicheskikh faktorov na Zemle i zvezdakh"*, Efimov A.A. red. [Collect. Pap "Manifestation of cosmic factors on the earth and stars" ed. by Efimov A.A.] Moscow, VAGO Publ., 1978, pp. 168–179 (in Russ.).
- [8] Cramer J.G. Generalized absorber theory and Einstein–Podolsky–Rosen paradox. *Phys. Rev. D*, 1980, vol. 22, pp. 362–376. DOI: 10.1103/PhysRevD.22.362
- [9] Pan J.-W., Bouwmester D., Weinfurter H., Zeilinger A. Photons that never interacted. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, vol. 80, no. 18, pp. 3891–3894. DOI: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.3891
- [10] Ma X.-S., Zotter S., Kofler J., Ursin R., Jennewien T., Brukner Č., Zeilinger A. Experimental delayed-choice entanglement swapping. *Nature Physics*, 2012, vol. 8, no. 6, pp. 479–485. DOI: 10.1038/nphys2294
- [11] Korotaev S.M., Serdyuk V.O. The forecast of fluctuating large-scale natural processes and macroscopic correlations effect. *Int. J. of Computing Anticipatory Systems*, 2008, vol. 20, pp. 31–46.

Статья поступила в редакцию 27.05.2014

Киктенко Евгений Олегович — аспирант кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, ведущий инженер Центра геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН). Автор более 18 научных работ в области физики квантовой информации и геофизики.

Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Российская Федерация, 142190, Москва, Троицк, а/я 30. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Kiktenko E.O. — post-graduate of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University, leading engineer of the Geoelectromagnetic Research Centre of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (GEMRC IPE RAS). Author of more than 18 publications in the field of physics of quantum information and geophysics.

GEMRC IPE RAS, P.O. Box 30, Troitsk, Moscow, 142190 Russian Federation.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Корогаев Сергей Маратович — д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией Центра геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН), профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 210 научных работ в области физических приложений теории информации, квантовой механики, классической электродинамики и геофизики.

Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Российская Федерация, 142190, Москва, Троицк, а/я 30.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Korotaev S.M. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of laboratory of the Geoelectromagnetic Research Centre of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (GEMRC IPE RAS). Author of more than 210 publications in the field of physical applications of information theory, quantum mechanics, classical electrodynamics and geophysics.

GEMRC IPE RAS, P.O. Box 30, Troitsk, Moscow, 142190 Russian Federation.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.