

Многофотонная квантовая телепортация

А.В. Белинский,^{1,*} А.П. Григорьева,¹ И.И. Джадан¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра математического моделирования и информатики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 05.06.2023; после доработки 13.07.2023; принята к публикации 25.07.2023)

Исследована возможность многофотонной телепортации с получением клонов запутанных между собой частиц. Рассмотрены вопросы причинности при осуществлении квантовой телепортации.

PACS: 42.50.Dv УДК: 53.03

Ключевые слова: квантовая оптика, квантовая нелокальность, принцип причинности, квантовые вычисления, квантовая криптография.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2350104](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2350104)

ВВЕДЕНИЕ

Квантовая телепортация привлекает интерес исследователей не только своей фундаментальной направленностью, но и широким использованием в прикладных исследованиях: криптографии, оптической коммуникации, в квантовых вычислениях [1]. При этом нелокальные явления, к которым необходимо отнести и квантовую телепортацию, порождают попытки локального объяснения. И нередко в жертву приносятся другие привычные представления, в том числе однозначный временной порядок. Среди них допущение «ретрокаузальности», впервые сделанное Вальтером Шоттки в 1921 г. [2] и развитое Уиллером и Фейнманом в форме времясимметричной квантовой теории [3]. К настоящему времени эти усилия оформились в ряд теоретических направлений, таких как векторный формализм двух состояний [4] и транзакциональная квантовая механика [5]. Объединяет эти усилия стремление утвердить реализм волновой функции путём отказа от направленности времени. Время рассматривается как параметр реалистического локального перемещения в двух противоположных направлениях. Формально этот подход отражается в трактовке кет-векторов как представлений антероградных волн, а бра-векторов — ретроградных по отношению к направлению времени. При этом конъюгаты антероградных и ретроградных векторов движения — скалярные произведения и матрицы плотности — трактуются как представления наблюдаемых результатов прямого и ретроградного воздействий и делаются попытки объяснения телепортации как «двунаправленного» во времени процесса, строятся схемы встречной телепортации состояний [6]. А сторонники информационной интерпретации КМ допускают возможности ретроградной передачи ин-

формации [7]. Развиваются и соответствующие приложения. Так, в [8] на основе векторного формализма двух состояний и близкого к нему формализма состояний двунаправленного времени делается попытка развития этого формализма и для квантовой телепортации, и для многокубитных вычислений. Отталкиваясь от этих теорий, мы получили несколько неожиданные результаты.

1. ТИПОВАЯ СХЕМА ТЕЛЕПОРТАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим схему телепортации [9] с двумя запутанными парами фотонов, приготовленных в результате параметрического рассеяния света [10] (рис. 1). Она является практическим развитием предложения, сформулированного в [1]. Отметим также работу [11] Эффект квантовой телепортации, как известно, заключается в передаче информации о некотором квантовом состоянии $|\phi_1\rangle$ из лаборатории А в В по двум каналам: квантовому и классическому с последующим «сведением» этой информации воедино и восстановлением на её основе состояния $|\phi_1\rangle$.

Практическая реализация отличается от принципиальной схемы, предложенной в [1]. Это объясняется трудностями в экспериментальном ответе на вопрос: в какое из четырёх белловских базовых состояний проецируется начальное состояние трёх частиц? Используемый группой Цайлингера [9], а также [11] метод предполагает установку светоделиителя на пути фотона 1 и одного из запутанной пары 2, 3 (рис. 1).

Задачу преобразования светоделиителем $|\phi_1\rangle$ и $|\phi_{2,3}\rangle$ можно решать с помощью соответствующего оператора, см., например, [12] или более простым и наглядным методом, предложенным в [13].

* E-mail: belinsky@inbox.ru

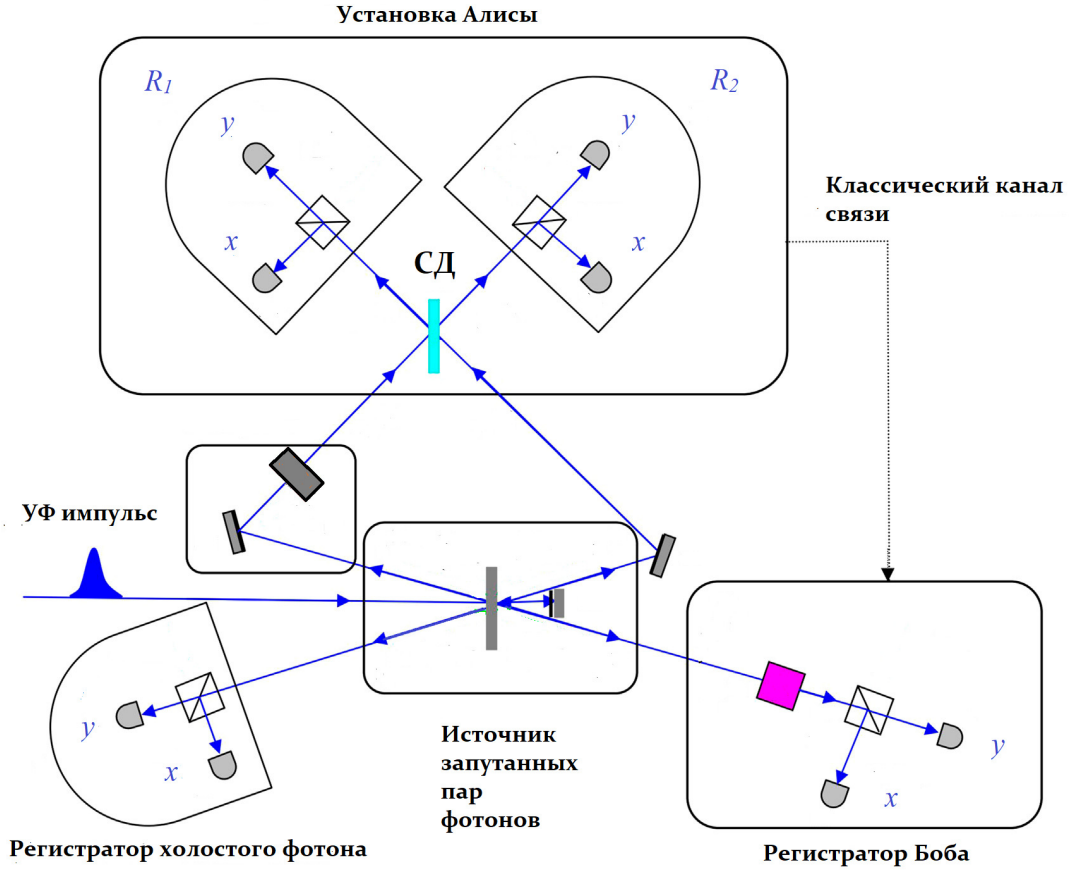


Рис. 1. Схема телепортационного эксперимента [9]. Импульс ультрафиолетового излучения подаётся на нелинейный кристалл для получения пар запутанных фотонов. После прохождения накачки кристалла и отражения от зеркала процесс повторяется с образованием ещё одной пары. СД — светоделитель. R_1 , R_2 — регистраторы Алисы. x — горизонтальная поляризация, y — вертикальная

Зададим

$$|\phi_1\rangle = a|x\rangle + b|y\rangle, \quad (1)$$

$$|\phi_{2,3}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|xy\rangle - |yx\rangle), \quad (2)$$

$$|\Psi_{12B}\rangle = \frac{1}{2} \left\{ a(|2x_1y_B\rangle - |2x_2y_B\rangle) + b(|2y_1x_B\rangle - |2y_2x_B\rangle) + \frac{1}{\sqrt{2}} [|x_1y_1\rangle (-a|x\rangle_B + b|y\rangle_B) + |x_1y_2\rangle (a|x\rangle_B + b|y\rangle_B) + |x_2y_1\rangle (-a|x\rangle_B - b|y\rangle_B) + |x_2y_2\rangle (a|x\rangle_B - b|y\rangle_B)] \right\} \quad (3)$$

Здесь двойками обозначены двухфотонные состояния в одном из каналов регистрации (1,2) Алисы.

Экспериментально получаемые совместные вероятности детектирования трех частиц полностью описываются (3). Если Алиса регистрирует два фотона с поляризациями x_1 , y_2 , то в результате редукции Боб получит точную копию состояния исходного фотона (1). Если x_2 , y_1 , то коэффициенты a и b окажутся с противоположным знаком, но состояние поляризации при этом не изменится, а добавится только фазовый сдвиг на π . Если же Алиса зарегистрирует два фотона с разной поляризацией в одном из своих приёмных каналов, что вполне

возможно в рассматриваемой схеме, то сможет телепортировать исходное состояние с разными комбинациями знаков a и b .

возможно в рассматриваемой схеме, то сможет телепортировать исходное состояние с разными комбинациями знаков a и b .

Так или иначе, телепортация осуществляется при одновременной регистрации Алисой двух фотонов разной поляризации, и информацию об этом она передаёт Бобу по классическому каналу, чтобы тот знал, в какой из реализаций какое состояние ему пришло.

Возникает простой вопрос: а что если Боб первый произвёл измерение пришедшего к нему фотона? Если в какой-то из реализаций он уже сам произведёт редукцию и как бы заранее предопре-

делит, какие коэффициенты a и b должна задать Алиса? Нет ли тут нарушения причинности? Но соотношение (3) такой возможности не допускает. Произведя измерение, Боб получит результат x или y , и коллапс уполовинит число слагаемых (3). Но обратного влияния на результат Алисы не произойдёт. Она получит ту же возможную комбинацию исходов, что и была до измерения своего фотона Бобом, т. е. никаких статистических предпочтений у Алисы не будет. В противном случае реализовался бы «сверхсветовой телеграф», запрещённый по communication theorem [14].

$$|\Psi_{A12B}\rangle = \frac{1}{2} \left\{ a(|y_A 2x_1 y_B\rangle - |y_A 2x_2 y_B\rangle) + b(|x_A 2y_1 x_B\rangle - |x_A 2y_2 x_B\rangle) + \frac{1}{\sqrt{2}} [|x_1 y_1\rangle (-a|y_A x_B\rangle + b|x_A y_B\rangle) + |x_1 y_2\rangle (a|y_A x_B\rangle + b|x_A y_B\rangle) + |x_2 y_1\rangle (-a|y_A x_B\rangle - b|x_A y_B\rangle) + |x_2 y_2\rangle (a|y_A x_B\rangle - b|x_A y_B\rangle)] \right\} \quad (4)$$

Итак, мы получили четырехфотонную запутанность, ещё не производя никакой телепортации. Это неудивительно, поскольку смешение на светоделителе запутывает фотоны [15]. Что же будет после регистрации Алисой фотонов 1 и 2? Мы получим в половине реализаций телепортацию квантового состояния «калибровочного» фотона Бобу, но при этом последний оказывается запутанным с холостым фотоном A . Таким образом, состояние (1) мы передали сразу двум фотонам, причём запутанным. Регистрация любого из них эту запутанность, разумеется, разрушит, т. е. клонирования частиц не получится в соответствии с теоремой о запрете клонирования, из которой следует, что если несколько состояний являются клонами, они должны быть запутанны [16].

Как видно из (4), вероятность P_t процесса телепортации составляет $1/2$. Это предельная теоретическая вероятность, поскольку при большей вероят-

2. МНОГОФОТОННОЕ ЗАПУТАННОЕ СОСТОЯНИЕ

В схеме на рис. 1 задействованы две запутанные пары фотонов. Поскольку они находятся в равноправных условиях, телепортация состояния должна происходить в обе стороны. Но какое состояние при этом будут телепортировано? Для выяснения этого вопроса обобщим результат (3) на холостой фотон Алисы, обозначив его индексом A . Тогда

возникающая асимметрия поляризационных состояний телепортированных фотонов давала бы возможность «мгновенного сверхсветового телеграфа». Например, взяв $|a|^2 = 1$, в случае $P_t > 1/2$, Боб в серии экспериментов почувствовал бы отклонение статистики поляризаций от симметричной, что соответствовало бы передаче бита информации без использования классического канала.

Усложним эксперимент. Добавим к полученному состоянию третью запутанную фотонную пару $|\phi_{45}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|xy\rangle + |yx\rangle)$. Для объединения её с двумя предыдущими в одну запутанную систему установим дополнительный светоделитель, через который пропустим фотон второй пары 3 и третьей 4. Схема представлена на рис. 2.

С учётом запутанности новой пары 4,5 после измерительного коллапса 1,2 с результатом $x_1 y_2$ и телепортации состояния, определяемого (a, b) , получим четырехфотонное состояние:

$$|\Psi_{A345}\rangle = \frac{1}{2} \left\{ a(|y_A 2x_3 y_5\rangle - |y_A 2x_4 y_5\rangle) + b(|x_A 2y_3 x_5\rangle - |x_A 2y_4 x_5\rangle) + \frac{1}{\sqrt{2}} [|x_3 y_3\rangle (-a|y_A x_5\rangle + b|x_A y_5\rangle) + |x_3 y_4\rangle (a|y_A x_5\rangle + b|x_A y_5\rangle) + |y_3 x_4\rangle (-a|y_A x_5\rangle - b|x_A y_5\rangle) + |x_4 y_4\rangle (a|y_A x_5\rangle - b|x_A y_5\rangle)] \right\}. \quad (5)$$

Последствия самой возможности получения в результате телепортации многокубитных состояний [17] для квантовой информатики и криптографии являются, с нашей точки зрения, интересными. Приготовление многофотонных запутанных клонов может быть полезным и в квантовых процессорах. В данном случае речь идёт о точном клонировании, так как до сих пор считалось, что теорема о запрете клонирования оставляет возможность только для клонирования с приближительной точностью [18].

Для построения логических квантовых вентилей унитарных матриц произвольного размера, достаточно линейных оптических элементов: зеркал, светоделителей и фазовых пластинок [19]. Квантовые процессоры такого рода не нуждаются в глубоком охлаждении. Универсальные линейно-оптиче-

ские квантовые процессоры уже созданы [20], но для повышения их эффективности необходимо увеличить число задействованных запутанных фотонов. Многофотонная телепортация, как представляется, решает эту проблему. Кроме того, она может быть полезна в распределённых квантовых вычислениях и квантовом интернете [21].

Также нуждается в определённой корректировке тезис о том, что защищённость информационного квантового канала абсолютна, поскольку равно одно состояние разрушается и одно воссоздаётся в другом месте. При этом несанкционированное вмешательство в квантовый канал связи может быть обнаружено. Но оказывается, что дело обстоит не совсем так, ибо холостой фотон Алисы является клоном телепортированного состояния и потенциально может быть «украден» злоумышленни-

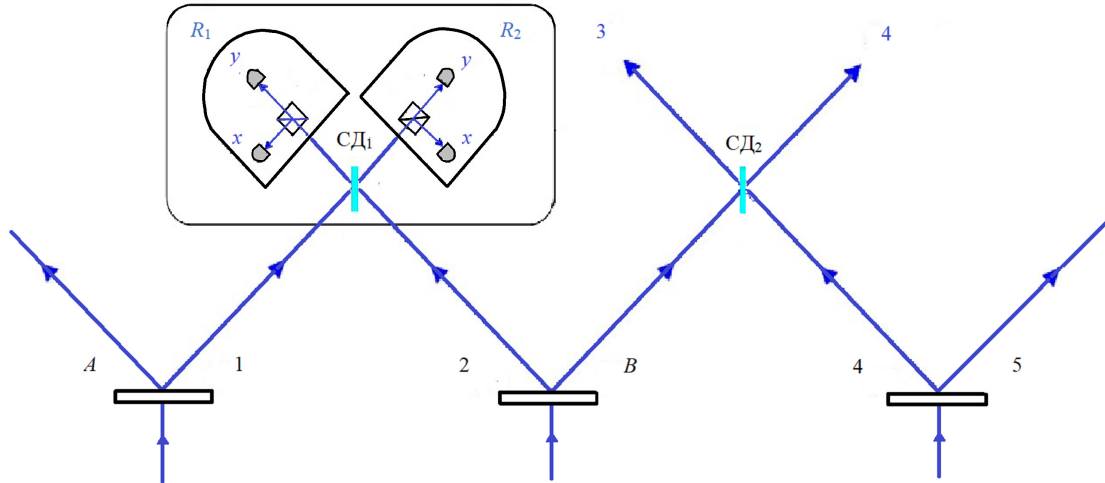


Рис. 2. Схема телепортационного эксперимента с тремя парами запутанных частиц. 4-фотонное запутанное состояние можно рассматривать как результат телепортации с образованием четырёх запутанных «клонов»

ками, причем Боб об этом не узнает. Хотя такая возможность довольно экзотична и маловероятна, ее все же следует учитывать в практических задачах криптографии и принимать меры к контролируемой утилизации неиспользуемых фотонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочастичная запутанность на сегодняшний день представляется феноменом, который достаточно трудно воспроизвести в лабораторных условиях [22, 23]. Тем не менее она имеет ключевое значение во многих приложениях [24, 25]. Для создания и поддержания её в квантовых вычислениях до сих пор используются громоздкие установки с глубоким охлаждением. При этом нередко упускается из вида то, что квантовая запутанность не является какой-то уникальностью, нуждающейся для своего поддержания экстремальных условий. Простой комбинаторный анализ говорит о том, что произвольная суперпозиция фотонных поляризаций может быть представлена в конечномерном базисе запутанности для соответствующего числа частиц. Другими словами, любое такое состояние является суперпозицией различных видов запутанности. Легко подсчитать, что при присоединении к запутанной многофотонной системе нового фотона, находящегося в суперпозиции поляризаций, число орт базиса многочастичной запутанности по поляризациям увеличивается в 4 раза, так что это число $k = 4^{n-1}$, где n — число частиц. В общем случае и обычную поляризационную суперпозицию одного фотона $a|x\rangle + b|y\rangle$ можно считать тривиальной запутанностью ранга 0 аналогично числу в степени 0. То, что на самом деле происходит в рассматриваемой схеме при двухчастичном коллапсе четырёхфотонного состояния и телепортации — это про-

екция суперпозиции запутанностей на одну из орт базиса запутанности. При этом общие коэффициенты a и b , будучи распределёнными по всем слагаемым суперпозиции, после коллапса части составляющих из оставшихся компонент никуда не пропадают. Этот процесс принято называть телепортацией, хотя коэффициенты, которые, условно говоря, «передаются», на самом деле остаются на месте. Поскольку квантовая система несепарабельна, эти коэффициенты, выражающие относительные величины, не исчезают при удалении части членов. В данном случае именно измеряемые относительные величины, стоящие за этими коэффициентами, являются объективной, не зависящей от описания реальностью, поскольку они не меняются тогда, когда мы элиминируем из системы часть частиц, называя это «коллапсом», что с необходимостью и ведёт к изменению описания всей системы. Однако для получения такого изменения нет необходимости, чтобы удалённый датчик Боба что-либо почувствовал и изменил каким-то образом свои показания. Для изменения описания нелокальной несепарабельной системы вполне достаточно локальных изменений в одной из частей. Таким образом, в поиске здесь физической каузальности, антероградной, сверхсветовой или ретроградной, также нет необходимости. Но для квантовых вычислений соображения, касающиеся изменения описания, имеют как раз ключевое значение, поскольку вычисления — это и есть трансформации описания для приведения его к требуемому виду.

Квантовые вычисления обычно начинаются с приготовления запутанного многокубитного состояния, которое необходимо поддерживать некоторое время, пока действуют логические вентили и произойдёт соответствующая эволюция. Но универсальность суперпозиции запутанностей, проявившая свои возможности в многофотонной

телепортации, позволяет надеяться на то, что можно будет поменять порядок: вначале действовать логическими вентилями на суперпозицию видов запутанности покомпонентно, а уж затем разделять полученные результаты по видам запутанности.

Как показывают расчёты, порядок регистрации фотонов запутанных пар не отражается на статистике фотоотчётов. Но не противоречит ли это принципу причинности? Необходимо ли, чтобы коллапс, знаменующий собой телепортационное событие, всегда происходил до получения квантового состояния? Изменяются ли итоговые вероятности, если фотон, на которого телепортируется состояние, будет зарегистрирован ещё до того, как произойдёт необходимый измерительный коллапс?

Как видно из описания протокола телепортации, момент времени, когда Боб регистрирует свой фотон, никакой роли в физических процессах не играет. Ничто не мешает Бобу измерить свой фотон ещё до того, как измерительный коллапс двух фотонов Алисы приведёт к телепортации. Если мы будем путём «квантовой томографии» [26] в серии повторных экспериментов определять получаемое Бобом состояние, то наблюдаемая статистика корреляций между поляризациями у Алисы и Боба будет полностью описываться вектором состояния. Никакого влияния на физические наблюдаемые порядок регистрации частиц Алисой и Бобом иметь не будет. Как нам представляется, эти соображения позволяют нам с осторожностью назвать такую телепортацию *телепортацией в прошлое*. Конечно, при этом мы должны сознавать, что никакой информации в прошлое реально не передаётся, а вместо этого Боб получает с ограниченной скоростью через классический канал информации ключ для интерпретации регистрационного события, происшедшего в прошлом. Такая зависимость от классического канала вполне соответствует запрету сверхсветовой передачи классического сигнала [27].

Проанализируем, не может ли вести условная «телепортация в прошлое» к каким-нибудь парадоксальным выводам, типа «эффекта бабочки» [28]? Допустим, Боб принял состояние, посланное Алисой «из будущего», которое пока ещё не случилось. К примеру, он мог бы послать Алисе по классическому каналу данные своего измерения, и Алиса, получив их, могла бы как-то изменить предварительные настройки, что привело бы к изменению коэффициентов a и b на a' и b' . В описании ситуации может сложиться впечатление, что уже случившееся прошлое изменено и Боб теперь

получит в своём прошлом другое квантовое состояние от Алисы. Но поскольку коллапс фотонов может случиться только один раз, Алиса не в состоянии послать Бобу в прошлое два совершенно разных состояния. Сколько раз настройки не менялись бы, фотон может быть измерен только один раз. Таким образом, изменив под влиянием информации от Боба свои предварительные настройки, Алиса изменила бы лишь описание, а не собственно физику процесса.

Интересно проанализировать телепортацию с точки зрения *принципа каузальной замкнутости физического мира* [29], согласно которому любой физический факт имеет физические и только физические причины. Это означает, что изменения нашего описания ни в коем случае нельзя считать причиной какого-либо физического процесса. Что касается телепортации, то её физической причиной следует считать декогеренцию квантового состояния двух зарегистрированных фотонов [30, 31]. Изменение нашего описания в виде измерительного коллапса состояния является уже следствием объективного и необратимого процесса декогеренции. Итак, с принципом каузальной замкнутости физического мира согласуется понимание декогеренции, как общей причины измерительного коллапса и телепортации в такого рода экспериментах.

Возвратимся к поставленному в начале статьи вопросу: является ли идея ретроградной каузальности необходимым элементом для объяснения ряда квантовых феноменов или всего лишь одной из возможностей? Как видно из нашего анализа телепортации, временной порядок не имеет значения, когда речь идёт о физических следствиях запутанности. Делать тут какие-то сильные дополнительные предположения, связанные с движением против оси времени или передачей информации против направления времени, совершенно не обязательно. Более того, при гладкой трансформации экспериментальных условий от телепортации в будущее к телепортации в прошлое гипотетические «антероградные» и «ретроградные» воздействия должны поменяться местами. Непонятно, на основании каких локальных закономерностей в таком случае свойства бра- и кет-векторов должны почувствовать эту перемену и обменяться друг с другом своими свойствами? Разумеется, такие игры могут происходить только в нашем описании, а не в природе как таковой. Это означает, что допущение ретрокаузальности не столько разрешает проблемы, сколько их создаёт.

- [1] Bennett C.H., Brassard G., Crépeau C. // *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1895. (1993).
 [2] Schottky W. // *Naturwissenschaften*, **9**(25), 492. (1921); Schottky W. // *Naturwissenschaften*, **9**(26), 506. (1921)
 [3] Wheeler J., Feynman R. // *Rev. Mod. Phys.* **17**, 157. (1945).

- [4] Aharonov Y., Vaidman L. *Time in Quantum Mechanics*, Vol. 1. pp. 399–447. (2008).
 [5] Cramer J.G. // *Rev. Mod. Phys.* **58** (3), 647. (1986).
 [6] Kiktenko E.O., Popov A.A., Fedorov A.K. // *Phys. Rev. A* **93**, 062305. (2016).
 [7] Suter D., Ernst M., Ernst R.R. // *Mol. Phys.* **78**. 95. 258. (1993).

- [8] *Kiktenko E.O.* // *Phys. Rev. Lett.* **107**, 032419 (2023).
 [9] *Bouwmeester D., Pan J.W., Mattle K.* et al. // *Nature*. N 390. 575. (1997).
 [10] *Boschi D., Branca S., De Martini F.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* **80**, 1121. (1998).
 [11] *Kim Y.-H., Kulik S.P., Shih Y.* // *Phys. Rev. Lett.* **86**, 1370 (2001).
 [12] *Leonhardt U.* Measuring the Quantum State of Light. Cambridge: Cambridge Univ. Press (1997). p. 69.
 [13] *Белинский А.В., Клевецов А.А.* // *УФН*. **188**. 335. (2018). (*Belinsky A.V., Klevtsov A.A.* // *Physics-Uspokhi*. **61** (3): 313. (2018).)
 [14] *Barnum H., Caves C.M., Fuchs C.A.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* **76**, 2818 (1996).
 [15] *Podoshvedov S.A.* // *JETP Letters*. **81**. 195. (2005).
 [16] *Wootters W., Zurek W.* // *Nature*. 299(5886), 802. (1982).
 [17] *Meyer D.A., Wallach N.R.* // *J. Math. Phys.* **43**. 4273. (2002).
 [18] *Bruss D., Ekert A., Macchiavello C.* // *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2598 (1998).
 [19] *Reck M., Zeilinger A., Bernstein H.J., Bertani P.* // *Phys.Rev. Lett.* **73**. 58. (1994).
 [20] *Carolan J., Harrold C., Sparrow C.* et al // *Science*. **349**, 711. (2015).
 [21] *Cuomo D., Caleffi M., Cacciapuoti A.S.* // *arXiv:2002.11808v2 [quant-ph]* 28 Mar 2020.
 [22] *Weinfurter H., Zukowski M.* // *ArXiv:quant-ph/0103049*
 [23] *Белинский А.В., Клышко Д.Н.* // *ЖЭТФ*. **102** (4). 1116. (1992). (*Belinskii A.V., Klyshko D.N.* // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. **75**, N 4. 606. (1992).)
 [24] *Wei T.-C., Goldbart P.M.* // *Phys. Rev. A* **68**, 042307. (2003).
 [25] *Horodecki R., Horodecki P., Horodecki M., Horodecki K.* // *Rev. Mod. Phys.* **81**, 865. (2009).
 [26] *Smithey D.T., Beck M., Raymer M.G.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* **70**(9). 1244. (1993).
 [27] *Blaylock G.* // *Am. J. Phys.* **78**(1), 111. (2010).
 [28] *Karkuszewski Z.P., Jarzynski C., Zurek W.H.* // *Phys. Rev. Lett.* **89**, 170405 (2002).
 [29] *Sarkar S., Pfeifer J.* // *Physicalism. The Philosophy of Science: N-Z, Index*, Taylor & Francis (2006). p. 566.
 [30] *Zurek W.H.* // *Physics Today*. **44**(10), 36. (1991).
 [31] *Менский М.Б.* // *УФН* **168**(9), 1017. (1998).

Multiphoton quantum teleportation

A.V. Belinsky^a, A.P. Grigorieva, I.I. Dzhadan

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

E-mail: ^abelinsky@inbox.ru

The possibility of multiphoton teleportation with the production of entangled particle clones has been studied. Issues of causality in quantum teleportation have been considered.

PACS: 42.50.Dv.

Keywords: quantum optics, quantum nonlocality, causality principle, quantum computing, quantum cryptography.

Received 05 June 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 5, pp. 603–608.

Сведения об авторах

1. Белинский Александр Витальевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: belinsky@inbox.ru.
2. Григорьева Алиса Павловна — студентка; e-mail: arisa1511@mail.ru.
3. Джадан Игорь Иванович — физик; e-mail: idezhdan@yandex.ru.