

УДК 530.145

DOI: 10.18384/2949-5067-2024-2-19-25

ОПИСАНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕЛЕПОРТАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЗАПУТАННЫХ СОЛИТОНОВ

Камалов Т. Ф.^{1,2,3}, Евдокимов Н. В.¹, Камалов Ю. Т.¹

¹ Государственный университет просвещения
141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,
Российская Федерация

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9,
Российская Федерация

³ Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Пушкинский филиал (ПушчГЕНИ), 142290, Московская обл., г.о. Серпухов, г. Пушкино, пр-т Науки, д. 3,
Российская Федерация

Аннотация

Цель статьи – описать телепортацию информации с помощью запутанных солитонов.

Процедура и методы. Исследовательским методом является модель квантовой телепортации свойств квантовых частиц, например фотонов, на основе описания классических запутанных солитонов.

Результаты. Рассмотренная модель демонстрирует перенос свойств солитонов, аналогичный квантовой телепортации – переносу свойств квантовых частиц.

Теоретическая и практическая значимость заключается в возможности рассмотрения квантовых явлений на таких классических объектах, как солитоны.

Ключевые слова: квантовая телепортация, би-фотоны, иллюзия сверхсветового распространения, солитоны

Благодарности. Авторы благодарны профессору Беляеву В. В. за общее руководство и ценные советы, которые повлияли на написание этой работы.

DESCRIPTION OF QUANTUM TELEPORTATION BASED ON MODELS OF ENTANGLED SOLITONS

T. Kamalov^{1,2,3}, N. Evdokimov¹, Yu. Kamalov¹

¹ Federal State University of Education
ulitsa Very Voloshinoy 24, Mytishchi 141014, Moscow Region, Russian Federation

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
Institutskiy pereulok 9, Dolgoprudny 141701, Moscow Region, Russian Federation

³ Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Pushchino Branch (PushchGENI),
prospekt Nauki 3, Pushchino 142290, Moscow region, Serpukhov urban district, Russian Federation

Abstract

Aim. Describe the teleportation of information using the model of entangled solitons.

Methodology. The research method is a model of quantum teleportation of the properties of quantum particles, such as photons, based on the description of classical entangled solitons.

Results. The considered model demonstrates the transfer of solitons properties, similar to the transfer of quantum particles properties, called quantum teleportation.

Research implications. The theoretical and practical significance lies in the possibility of considering quantum phenomena on such classical objects as solitons.

Keywords: quantum teleportation, biphotons, illusion of superluminal propagation, solitons

Acknowledgments. The authors are grateful to Professor V. V. Belyaev for the general guidance and valuable advice that influenced the writing of this work.

Введение

Квантовая телепортация означает операцию по переносу квантового состояния одного квантового объекта другому. Для этого используются два канала, квантовый и классический. Под квантовым каналом подразумевается система из двух квантовых частиц в запутанном состоянии. По классическому каналу передаётся информация об измерении, выполненном на передающей стороне над системой частиц, одна из которых является носителем передаваемого состояния, а вторая – одна из пары запутанных частиц. При этом первоначальное, передаваемое, состояние у частицы изменяется. На приёмной стороне, на основе полученной по классическому каналу информации о совершенных на передающей стороне операциях, со второй из пары запутанных частиц проводится аналогичная операция, что приводит эту частицу в требуемое состояние. Несмотря на то, что запутанность частиц означает постоянную корреляцию их состояний, мгновенной передачи состояния или свойств частицы не происходит, как не происходит мгновенной передачи информации или энергии. Под «телепортацией» подразумевается перенос состояния одной частицы на другую, при том, что первоначальное состояние первой частицы разрушается, то есть изменяется во время произведённых над парой частиц действий.

Ключевым моментом здесь является то, что квантовое состояние телепортируемой частицы не передаётся по классическому каналу связи между отправителем и получателем, а передаётся результат измерения отправителя, и получатель использует этот результат для выполнения операций над своей половиной запутанной пары, чтобы воссоздать телепортированное состояние.

Таким образом, процесс квантовой телепортации не нарушает принцип причинности, поскольку в итоге информация не передаётся быстрее скорости света, так как процедура требует передачи информации по классическому каналу для гарантированного получения телепортированного состояния.

В то же время существуют классические объекты, которые также обладают требуемыми корреляционными свойствами. Таковыми могут быть, например солитоны, которые рассмотрены в данной работе. В отличие от квантовых, свойства

классических частиц не разрушаются при измерении, что позволяет говорить скорее о клонировании, чем о телепортации. Однако ничто не мешает нам принудительно уничтожить исходный объект, чтобы превратить клонирование в телепортацию в том смысле, в котором понимается квантовая телепортация.

Телепортация солитонов

Для описания квантовой телепортации на основе модели запутанных солитонов определим вспомогательную комплексную векторную функцию

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\nu A + \frac{i}{\nu} \pi \right), \quad \pi = -\epsilon E, \quad (1)$$

где константа $\equiv$ определяется условием нормировки

$$\hbar = \int dz |\varphi|^2, \quad (2)$$

$\hbar$ постоянная Планка. Стохастическое представление одночастичной волновой функции Ψ_N может быть определено как линейная комбинация функций (1), определённых в N независимых испытаниях:

$$\Psi_N(t, z) = (\hbar N)^{-\frac{1}{2}} \sum_{j=1}^N \varphi_j(t, z) \quad (3)$$

Индекс φ в (3) пробегает по множеству независимых (случайных) испытаний, число которых N должно быть очень большим (частотная гипотеза фон Мизеса). Таким образом, формула (3) даёт стохастическую реализацию волновой функции через объекты-солитоны бесконечной размерности.

Чтобы показать, что Ψ_N играет роль амплитуды вероятности, достаточно вычислить интеграл

$$\rho_N = \frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V \subset \mathbb{R}^1} dz |\Psi_N|^2 \quad (4)$$

который берётся за малый объём (интервал) $\Delta V \gg V_0$, где $V_0 \sim 1/\kappa$ обозначает собственный объём (размер) солитона. Легко показать, что с вероятностью $P = 1 - \alpha V_0 / \Delta V$, $\alpha \sim 1$, интеграл (4) равен

$$\rho_N = \frac{\Delta N}{N \Delta V}, \quad (5)$$

где ΔN – число испытаний, для которых центры частиц-солитонов оказываются заключёнными в ΔV . Поэтому ρ_N можно отождествить с плотностью вероятности координат. Рассмотрим теперь процедуру измерения некоторой наблюдаемой величины A по теореме Нётер, генератору группы симметрии $\hat{M}_A$. Например, импульс P связан с генератором трансляции пространства $\hat{M}_P = -i\nabla$, угловой момент L связан с генератором вращения пространства $\hat{M}_L = J$ и так далее. В результате можно представить классическую наблюдаемую величину A_j , сначала для φ -го испытания, проведённого в эксперименте с трёхмерной частицей-солитоном, в виде

$$A_j = \int d^3x \pi_j i \hat{M}_A \phi_j = \int d^3x \varphi_j^* V \varphi_j$$

где π_j – обобщённый импульс в ϕ -ом испытании, а ϕ_j – обобщённая координата. В нашем случае $\mathfrak{J}j$ соответствует A_j , а π_j соответствует $\pi_j = -E_j$. Среднее значение имеет вид:

$$\mathbb{E}(A) \equiv \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \int d^3x \phi_j^* \hat{M}_A \phi_j = \int d^3x \Psi_N^* \hat{A} \Psi_N + O\left(\frac{V_0}{\Delta V}\right), \quad (6)$$

где оператор $\hat{A}$ означает $\hat{A} = \hbar \hat{M}_A$. Таким образом, до членов порядка $V_0/\Delta V \ll 1$ мы получаем стандартное квантовомеханическое правило для вычисления средних значений наблюдаемых величин [1; 2]. Аналогичные выражения можно найти для наших одномерных частиц-солитонов. Например, оператор спина имеет стандартный вид

$$(\hat{S}_k)_{lm} = -i\hbar \epsilon_{klm},$$

в виде матрицы вращения в $\mathbb{R}^3$.

Теперь мы рассмотрим двухсолитонные синглетные состояния [3; 4], то есть построим конфигурацию запутанных солитонов с нулевым спином и импульсом:

$$\varphi^{(12)}(t, z_1, z_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\varphi_L(t, -z_1) \otimes \varphi_R(t, z_2) - \varphi_R(t, -z_1) \otimes \varphi_L(t, z_2)] \quad (7)$$

Условие нормирования для формулы (7) имеет вид

$$\int dz_1 \int dz_2 \varphi^{(12)*} \varphi^{(12)} = \hbar^2$$

Теперь нетрудно найти выражение для стохастической волновой функции для синглетного двухсолитонного запутанного состояния:

$$\Psi_N(t, z_1, z_2) = (\hbar^2 N)^{-\frac{1}{2}} \sum_{j=1}^N \varphi_j^{(12)}, \quad (8)$$

где $\varphi_j^{(12)}$ соответствует конфигурации запутанных солитонов в ϕ -ом испытании.

В заключение мы выражаем надежду, что этот формализм запутанных солитонов может быть пригоден для моделирования реальных фотонов.

Обсуждая нелокальность квантовых корреляций запутанных состояний для наблюдателей А и В, мы видим, что возникает иллюзия передачи информации из А в В. Иными словами, взаимодействие запутанных состояний квантовых объектов в А и В следует из экспериментально наблюдаемых их корреляций. Таким образом, было бы правильно отрицать сверхсветовое взаимодействие или передачу информации быстрее скорости света. Другими словами, существование квантовой нелокальности и квантовых корреляций означает скорее иллюзию, чем реальность какой-либо передачи информации быстрее скорости света.

Проведём воображаемый эксперимент классического аналога телепортации квантовых поляризационных состояний бифотонов.

Для этого рассмотрим классический аналог телепортации бифотон-поляризационных состояний с квантовой запутанностью. Классический аналог этой ситуации можно рассмотреть на примере запутанных солитонов с коррелированными состояниями в А и В.

Если наблюдатель в пункте А измеряет состояние фотона, то совпадение его состояния с состоянием другого фотона (солитона) в пункте В может быть описано ненулевым коэффициентом корреляции. Это так, потому что информация о измерениях в пунктах А и В коррелирует с ненулевым коэффициентом.

Полное совпадение информации может произойти только при условии, если наблюдатели А и В измерят состояния запутанных фотонов (солитонов).

Если запутанные фотоны (солитоны) разные, но оба с одинаковой поляризацией, то коэффициент корреляции равен единице. Чтобы добиться полного совпадения измерений с коэффициентом корреляции, равным единице, надо наблюдателю А сообщить наблюдателю В, какой фотон (солитон) выбрать.

Поэтому в точках А и В измерения поляризаций фотонов (солитонов) всегда коррелируют.

Заключение

Мы симулировали процесс квантовой телепортации запутанных фотонов между наблюдателями А и В с помощью математической модели запутанных солитонов. В результате становится понятно, что одинаковые состояния поляризации запутанных фотонов выбираются с помощью классического канала передачи информации между наблюдателями А и В. В результате процесс телепортации квантового состояния фотонов является иллюзией передачи квантовой информации из А в В. Эта иллюзия создаётся с помощью классической линии связи. Никакого превышения скорости света в процессе квантовой телепортации состояний фотонов нет.

Статья поступила в редакцию 01.03.2023

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбаков Ю. П., Камалов Т. Ф. Стохастические гравитационные поля и квантовые корреляции // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Физика. 2002. № 10. С. 5–7.
2. Рыбаков Ю. П., Терлецкий С. А. Динамика солитонов во внешних полях и квантовая механика // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Физика. 2004. № 12. С. 88–112.
3. Rybakov Yu. P., Kamalov T. F. Entangled solitons and stochastic q-bits // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2007. Vol. 4. No. 2. P. 119–121. DOI: 10.1134/S1547477107020033.
4. Rybakov Yu. P., Kamalov T. F. Probabilistic simulation of quantum states // Proceedings of the SPIE. 2009. Vol. 7023: Quantum Informatics 2007. Article: 702307. DOI: 10.1117/12.801898.

REFERENCES

1. Rybakov Yu. P., Kamalov T. F. [Stochastic gravitational fields and quantum correlations]. In: *Vestnik rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Fizika* [Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Physics], 2002, no. 10, pp. 5–7.
2. Rybakov Yu. P., Terletsy S. A. Solitons' dynamics in external fields and quantum mechanics. In: *Vestnik rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Fizika* [Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Physics], 2004, no. 12, pp. 88–112.
3. Rybakov Yu. P., Kamalov T. F. Entangled solitons and stochastic q-bits. In: *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2007, vol. 4, no. 2, pp. 119–121. DOI: 10.1134/S1547477107020033.
4. Rybakov Yu. P., Kamalov T. F. Probabilistic simulation of quantum states. In: *Proceedings of the SPIE*, 2009, vol. 7023: Quantum Informatics 2007, article: 702307. DOI: 10.1117/12.801898.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Камалов Тимур Фянович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики Государственного университета просвещения; доцент кафедры теоретической физики Московского физико-технического института (национального исследовательского университета); доцент факультета цифровых технологий ПушчГЕНИ – филиала университета РОСБИОТЕХ;
e-mail: timkamalov@gmail.com

Евдокимов Николай Валерьевич – аспирант кафедры теоретической физики Государственного университета просвещения;
e-mail: nv.evdokimov@gmail.com

Камалов Юрий Тимурович – аспирант кафедры теоретической физики Государственного университета просвещения;
e-mail: kamalov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Timur F. Kamalov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Theoretical Physics, Federal State University of Education; Assoc. Prof., Department of Theoretical Physics, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University); Assoc. Prof., Department of Digital Technologies, PushchGENI – Branch of the Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH);
e-mail: timkamalov@gmail.com

Nikolay V. Evdokimov – Postgraduate Student, Department of Theoretical Physics, Federal State University of Education;
e-mail: nv.evdokimov@gmail.com

Yuriy T. Kamalov – Postgraduate Student, Department of Theoretical Physics, Federal State University of Education;
e-mail: kamalov@gmail.com

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Камалов Т. Ф., Евдокимов Н. В., Камалов Ю. Т. Описание квантовой телепортации на основе модели запутанных солитонов // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2024. № 2. С. 19–25.

DOI: 10.18384/2310-7251-2024-2-19-25.

FOR CITATION

Kamalov T. F., Evdokimov N. V., Kamalov Yu. T. Description of quantum teleportation based on models of entangled solitons. In: *Bulletin of Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2024, no. 2, pp. 19–25.

DOI: 10.18384/2310-7251-2024-2-19-25.