

УДК 530.15

© Гуц А. К., 2019

КВАНТОВАЯ МАШИНА ВРЕМЕНИ

Гуц А. К.^{a,1}^a Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, 644077, Россия.

В статье обсуждаются недостатки классического подхода к конструированию машины времени, основанного на идее использовать замкнутые времениподобные кривые. Говорится о необходимости использовать квантовую механику. Дается аксиоматика квантовой механики, принадлежащая А.Д. Александрову. Приводятся различные конструкции так называемой квантовой машины времени: эффективная машина времени Светличного, использующая квантовую телепортацию, квантовая AAPV-машина времени, машина времени Грея, не-Гёделевская машина времени. Демонстрируется, как в с помощью квантовых машин времени разрешаются временные парадоксы.

Ключевые слова: замкнутые времениподобные кривые, машина времени Гёделя, кротовые норы, квантовая механика, квантовая телепортация, квантовая интерференция, квантовая машины времени.

THE QUANTUM TIME MACHINE

Guts A. K.^{a,1}^a Dostoevsky Omsk State University, Omsk, 644077, Russia.

In the article we discuss the shortcomings of the classical approach to design of time machine based on the idea of closed timelike curves. The necessity of using quantum mechanics is discussed. The A.D. Alexandrov's axiomatics of quantum mechanics is given. Different constructions of the so-called quantum time machines such as Svetlichny's effective time machine using quantum teleportation, quantum AAPV-time machine, Gray's time machine, non-Gödel time machine are given. One is demonstrated as in using quantum time machines, time paradoxes are resolved.

Keywords: close timelike curve, the Gödel's time machine, wormholes, quantum machine, quantum time machine.

PACS: 03.67.-a, 03.65.Ud, 04.00.00, 04.62.+v, 04.60.-m

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2019.3.20-44

Введение

Общая теория относительности, созданная Эйнштейном, Гроссманом и Гильбертом, благодаря работе выдающегося австрийского логика Курта Гёделя, указала физикам на возможный путь создания машины времени – устройства, которое способно перемещать своего пилота в собственное прошлое.

До этого физики всерьез рассматривали иную конструкцию машины времени, которая обращает течение времени вспять ($t \rightarrow -t$). Отличие машины времени Гёделя от такой машины состоит в том, что не требуется заставлять время течь в обратном направлении. Сходство в том, что как пространство-время Минковского-Эйнштейна, так и пространство-время Галлилей-Ньютона абсолютны, в том смысле что они даны как вечно существующая сущность, события в которых всегда присутствуют, причем не только события настоящего, но равным образом события прошлого и события будущего.

¹E-mail: aguts@omsu.ru

В пространстве-времени Галлилея-Ньютона, световые конусы в котором имеют границей гиперплоскость, возврат к событиям прошлого происходит за счет обращения временной координаты, а в пространстве-времени Минковского-Эйнштейна за счет наличия особого наклона световых конусов, способствующего появлению гладких замкнутых времениподобных мировых линий (СТС), иначе говоря, временных петель. Временные петли, лежащие в пространстве-времени, позволяют путешественнику во времени вернуться назад во времени и провзаимодействовать со своим собственным прошлым.

Обратим внимание на следующее обстоятельство: с 1949 года по 1987 год практически не было работ по машине времени Гёделя. Это связано с тем, что физические условия в пространствах-временах, обладающих временными петлями, совершенно не конформны для путешественника во времени: или необходимо преодолевать гигантские расстояния, либо бороться с колоссальными гравитационными полями [1].

Вывод, который напрашивался: надо строить машину, которая способна переделывать топологию и геометрию пространства-времени так, чтобы в нем появлялись временные петли. Правда, для этого необходимо расстаться с иллюзией под названием абсолютность пространства-времени. Но именно на этой иллюзии и базируется идея машины времени в общей теории относительности (ОТО). В абсолютном пространстве-времени события прошлого расположены многообразии подобно вещам в бабушкином сундуке – они лежат в неприкосновенности. Путешествие в прошлое по временной петле позволяет заглянуть в бабушкин сундук ничего в нем не трогая. Но построение машины времени как технического аппарата означает грубое вторжение во внутрь сундука, поскольку к пространству-времени подклеивается кротовая нора – топологическая ручка на языке топологов, означающее изменение топологии пространства-времени, – и конец этой ручки вторгается в сундук. Наличие такой ручки способствуют появлению временной петли. Все ли в сундуке бабушки остается в сохранности? Сомнительно, а, следовательно, прошлое разрушается и вполне может исчезнуть то, ради чего все было затеяно. В итоге мы получили совсем иное пространство-время, т. е. новое 4-мерное многообразие с новой топологией и геометрией. Часть событий прошлого при этом претерпевают как геометрические перемещения, так и топологические метаморфозы (склеивание событий, раздвоение) (см. рис. 1). Абсолютный вечно неизменный Мир событий теряет свою абсолютность, и возникает вопрос о сохранности того прошлого, к которому устремлялась машина времени.

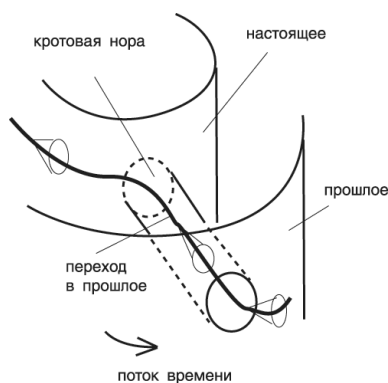


Рис. 1. Переход в прошлое по 4-мерной кротовой норе в пространстве-времени, свернутом в пружину. В таком пространстве-времени выход в объемлющее гиперпространство и «подклеивание» к прошлому идет в 5-мерном потоке времени, индуцирующем поток времени в пространстве-времени.

Топологическая грамотность, которой овладели некоторые физики в 1970-е годы, привела Торна и других к идее отправляться в прошлое через 3-мерные кротовые норы. Идея ошибочная, поскольку неявно предполагает, что вдоль короткой 3-ручки время синхронно на ее концах [3], а временная петля появляется за счет кинематического движения одного из концов 3-ручки или по-

мещения его в сильное гравитационное поле¹. Это противоречит принципу эквивалентности. Автор в свое время написал об этом Visser'у, готовящему свою книгу *Lorentzian Wormholes* к публикации, и соответствующий параграф был переписан в более нейтральной форме, правильной по сути, но бесполезный для искусственной реализации машины времени.

Масса современных статей по 3-мерным кротовым норам мало имеет отношения к машине времени, поскольку в них изучается не пространство с 3-ручкой, а 3-мерный цилиндр, края которого, как думают авторы, можно отождествить нужным образом (а надо еще учесть 4-е измерение). Но пока этого никто не сделал, и сделать это непросто, как отмечал в свое время М.Ю. Константинов [2]. Тем не менее, эти работы полезны для реализации сверхбыстрых перемещений в пространстве.

Сам автор показал [3], что искусственным образом можно построить машину времени Гёделя, используя 4-мерные кротовые норы, меняющие 1-связность пространства-времени, и закручивая 4-мерное пространство-время в 5-мерном объемлющем гиперпространстве в форме пружинного слоя (рис. 1). Но существует ли это объемлющее гиперпространство?

Напрашивается мысль: не попадаем ли мы в ловушку, подобно физикам эпохи классической механики, и наша идея видеть в машине времени временные петли ничуть не лучше идеи обращения времени. Разница лишь в используемом математическом аппарате – наш более изощренный, чем в XIX веке, и в силу этого наш ум подпадает под гипноз, именуемый временными петлями в ОТО, и которому труднее противостоять.

1. Что такое прошлое в ОТО: реально ли оно?

Общая теория относительности (ОТО) имеет дело с пространством событий Минковского, которое позже стали называть пространством-временем. Пространство событий Минковского было формализовано как, первоначально, 4-мерное псевдоевклидово многообразие, а затем как 4-мерное псевдориманово многообразие. Поэтому событие прошлого при такой формализации – это точки или множество точек псевдориманова многообразия. Следовательно, событие – это всего лишь набор из четырех чисел (t, x, y, z) .

С изменениями геометрии и топологии, реализующими машину времени, которые совершаются по воле человека, сами события Мира событий (пространства-времени) не связаны. Они должны оставаться безучастными участниками грандиозных событий. Поэтому вряд ли можно как-то их трансформировать. Следовательно, не стоит опасаться временных парадоксов. Можно ли это экспериментально доказать, опираясь на модели машины времени? Квантовые машины времени, описываемые ниже, являются таковыми моделями и соответствующие эксперименты с ними подтверждают отсутствие парадоксов при прохождении временных петель.

Реальность бытия областей событий, относящихся к Прошлому, – это вопрос о реальности самого 4-мерного пространства-времени. Об этом мы писали в [3, 4]. Многое говорит в пользу реальности событий Прошлого.

Вроде бы этот факт говорит нам о том, что машина времени возможна. Но слишком много вопросов возникает при попытках конструирования машины времени в рамках ОТО [5].

2. Место квантовой механики в описании Вселенной

Бесконечные трудности, физические, математические, а также философские, возникающие при конструировании машины времени при использовании для этого ОТО, наталкивают на мысль, что следует обратиться к другой фундаментальной теории XX века – к квантовой механике.

Однако для многих современных физиков квантовая механика – это теории описания микромира. Поэтому если и заходит речь об устройстве, перемещающем физический объект в прошлое

¹ Впрочем, этот конец 3-ручки можно подклеить к требуемой области прошлого, но это уже не машина времени Торна. Да и задача подклейки к области прошлого приводит к проблеме «проталкивания» конца ручки в потоке 5-времени, объемлющего гиперпространства.

на основе квантовой механики, то под объектом имеют в виду микрообъект – элементарную частицу (протон, электрон и пр.), и при этом неявно присутствует тень принципа «обращение времени вспять».

Доводом микромирового уровня квантовой механики как инструмента описания явления является присутствие в расчетных формулах крайне малой по величине постоянной Планка. Однако в ОТО также всегда присутствует малая по величине гравитационная постоянная, а тем не менее описываются макроскопические явления. Обнаружение все большего количества макроскопических квантовых эффектов заставляет думать о том, что дела не в микроскопичности квантовой механики, а в нашем традиционно узком понимании места квантовой теории в описании Вселенной.

Для решения проблемы построения машины времени ОТО явно не подходит, хотя бы потому, что она не дает возможности дать такое определение Прошлого, в котором отсутствие временных парадоксов становится очевидным. Парадоксы, на самом-то деле, указывают нам на существование некоторой истины, но представляют они ее нам ее в форме похожей на ложку².

3. Аксиоматика квантовой механики

Классическая механика описывает движение тел в пространстве, понимая под их физическим состоянием смену места и пребывание во вращении. Квантовая механика начинает с определения состояния тела (системы), которое подчиняется уравнению Шрёдингера. Неявно до сих пор многими физиками считается, что квантовая механика – это механика микромира, а классическая механика – механика макромира.

А.Д. Александров еще в 1934 году [6] показал, что такой взгляд на квантовую механику является ошибочным: основное уравнение квантовой механики – уравнение Шрёдингера, а также коммутационное соотношение для операторов координаты и импульса, – всего лишь следствия уравнения движения Ньютона, переформулированного с учетом замены точных значений координаты и импульса тела на их средние значения.

Заблуждение физиков объясняется очень просто: в начале XX века интересы пассивных физиков сконцентрировались на познании структуры атома, электронов, т. е. того, что сейчас называется микромиром. Для этого были разработаны матричная и волновая механики, объединившиеся под именем квантовой механики. Все усилия и разработки в рамках квантовой механики были направлены на микромир. Раскрытие квантовых свойств макромира ждало своего часа до XXI века.

Работу А.Д. Александрова можно изложить в следующей аксиоматической форме.

Аксиома 1. *Физическое состояние тела описывается некоторой величиной ψ , которая принимает комплексные значения, меняющиеся при переходе от одной точки (события) в пространстве-времени к другой. Иначе говоря, полагаем, что*

$$\psi = \psi(x, y, z, t).$$

Поскольку желательно отойти от классического рассмотрения тела как материальной точки, то исчезает возможность приписывания телу в любой данный момент t точных координат (x, y, z) местонахождения тела.

Взамен вводим среднее значение координат $\langle \vec{r} \rangle = (\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle)$ местонахождения тела – координаты центра массы тела, если прибегнуть к классической терминологии, которое вычисляется по правилу

$$\langle x \rangle = \iiint \bar{\psi}(x, y, z, t) x \psi(x, y, z, t) dx dy dz,$$

²Пересказ мысли, высказанной писателем Александром Кроном в романе «Бессоница».

$$\langle y \rangle = \iiint \bar{\psi}(x, y, x, t) x \psi(x, y, x, t) dx dy dz,$$

$$\langle z \rangle = \iiint \bar{\psi}(x, y, x, t) x \psi(x, y, x, t) dx dy dz.$$

Аксиома 2. Пусть тело находится в потенциальном поле $U(x, y, z, t)$. Примем, как постулат, следующее уравнение движения тела с массой m в поле U :

$$m \frac{d^2}{dt^2} \langle \vec{r} \rangle = \iiint \bar{\psi}(x, y, x, t) (\nabla U) \psi(x, y, x, t) dx dy dz. \quad (1)$$

Для того чтобы описывать физические состояния тела, нам теперь требуется уравнения движения для функции $\psi(x, y, x, t)$, которую будем называть *волновой функцией* или *ψ -функцией*.

Определим оператор импульса \hat{p} с помощью уравнения

$$m \frac{\partial}{\partial t} \int \bar{\psi} x \psi d\tau = \int \bar{\psi} \hat{p} \psi d\tau.$$

Тогда уравнение (1) переписывается в виде

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \bar{\psi} \hat{p} \psi d\tau = \int \bar{\psi} \frac{\partial U}{\partial x} \psi d\tau.$$

Для краткости ограничимся рассмотрением одномерного случая.

Теорема 1. Существует действительное число \hbar такое, что справедливо равенство

$$\hat{p}x - x\hat{p} = -i\hbar. \quad (2)$$

Теорема 2. Волновая функция удовлетворяет уравнению движения

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left(\frac{1}{2m} \hat{p}^2 + U \right) \psi, \quad (3)$$

называемого уравнением Шрёдингера.

Мы видим, что квантовая механика в изложении А.Д. Александровым, – это более совершенный вариант классической механики, способный одинаково хорошо описывать как явления микромира, так и явления макромира.

4. Квантовые машины времени

Машина времени – это устройство, принадлежащее макромиру и созданное для перехода в макромир Прошлого. Возможности квантовой теории более обширны, чем думается, и раскрываемые в последние годы квантовые свойства макрообъектов поражают своей парадоксальностью. Квантовая парадоксальность против парадоксальности классической машины времени с необходимостью ведут нас к построению квантовой машины времени.

При этом следует иметь в виду, что предлагаемые различными авторами проекты квантовой машины времени отправляют назад во времени как квантовые состояния частиц, т. е. только квантовую информацию о них, так и реальные физические частицы или объекты.

Теория машины времени Гёделя сталкивается с временными парадоксами, самым известным является парадокс дедушки³, когда путешественник, попав в прошлое убивает своего дедушку (или самого себя молодого), и по логике вещей должен сам тут же исчезнуть, поскольку он должен отсутствовать в будущем, из которого он начал свое путешествие.

³Иные парадоксы: парадокс забывчивости, парадокс недоказанной теоремы и др.

Квантово-механическое рассмотрение вопроса о путешествиях в прошлое формально устраняет все известные временные парадоксы, хотя вопросы о причинно-следственных связях остаются [9, 12]. Впрочем увязывание причинности и существование временных петель, или замкнутых причинных цепей, как их подчас называют, вряд ли уместно. Об этом говорит сформулированный в 1975 году И.Д. Новиковым принцип самосогласованности, относящийся к машине времени Гёделя и утверждающий, что события, связанные с временными петлями самосогласованы и не приводят к противоречиям [13].

Об этом же независимо писал А.Д. Александров: «Считают, что наличие таких цепей недопустимо, невозможно, «так как оно противоречит понятию причинности». Это соображение, однако, неосновательно, потому что неосновательно думать, будто природа должна согласовываться с нашими понятиями. Понятие причинности отвечает локальной структуре природы, из нее оно и взято, но это не значит, что в иных пределах это понятие не требует изменений» [14, с.11].

Ключевую роль для развития теории квантовой машины времени сыграла статья Дэвида Дойча [9], в которой проблемы, связанные с существованием временных петель, рассматривались с точки зрения квантовой механики, а приведенное в рамках квантовых сетей моделирование СТС показало, что самосогласованное решение для квантового состояния, проходящего через СТС, всегда существует, и все классические временные парадоксы исчезают [12].

4.1. Квантовая машина времени Дойча

Известный специалист в области квантовых вычислений Давид Дойч [9] обратился к квантовой механике, а точнее, к квантовой теории вычислений с целью анализа физических эффектов временных петель. Он заявил, что классический подход к исследованию пространств-времен с СТС, во-первых, порождает массу парадоксов, противоречащих «принципам философии науки», а во-вторых, «классические модели пространства-времени не учитывают квантовую механику, которая, даже несмотря на любые эффекты квантовой гравитации, фактически доминирует как в микроскопической, так и в макроскопической физике на всех замкнутых временноподобных линиях и вблизи них».

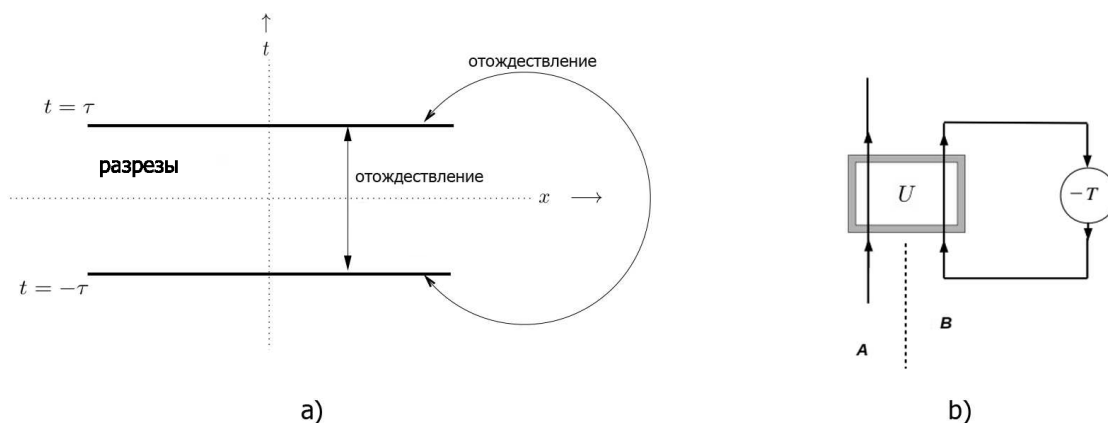


Рис. 2. а) 4-мерная кротовая нора с СТС в пространстве-времени; б) квантовая сеть, называемая D-СТС, моделирующая СТС, изображенную слева. Процесс в квантовой сети представлен унитарным оператором (гейтом) \hat{U} , описывающим динамическую связь двух частей системы (обозначаются как A и B). «Шаг назад во времени» обозначается как $-T$; B -часть результата процесса снова подается в процесс как начальное состояние B -части. Здесь T – время, необходимое для гейта \hat{U} , чтобы выполнить вычисление [10].

Дойч смоделировал (см. рис. 2) временные петли (СТС), используя принципы квантовых сетей ⁴. Его петли обозначают как D-СТС. Затем он проанализировал парадоксальные ситуации,

⁴Квантовая сеть – это квантовое вычислительное устройство состоящий из квантовых логических элементов

возникающих благодаря временным петлям (СТС) в пространстве-времени с точки зрения необходимой обработки информации, представляя потоки информации рассматриваемых физических ситуаций в форме модельной D-СТС.

Фактически Дойч создал квантово-компьютерную модель машины времени, которую будем называть D-СТС *машиной времени*, или просто D-СТС. В отличие от моделирования путешествий во времени, основанное на машине времени Гёделя в рамках ОТО, а это означает моделирование, опирающееся на аппарат псевдоримановой геометрии, моделирование, основанное на D-СТС машине времени Дойча, – это моделирование, учитывающее эффекты квантовой механики в форме квантовых сетей, т. е. с учетом передачи и обработки квантовой информации.

1. Условие согласования Дойча. Изучаемая Дойчем двухчастичная система состоит из двух частей A и B , описываемых гильбертовыми пространствами \mathcal{H}_A и \mathcal{H}_B и подвергаемых преобразованию посредством гейта $\hat{U} : \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B \rightarrow \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$, моделирующего СТС.

Пусть оператор плотности $\rho_A \in \mathcal{H}_A$ – исходная «молодая» версия частицы, $\rho_B \in \mathcal{H}_B$ – «старая» версия частицы. Совместный оператор плотности частиц A, B до взаимодействия (встречи в петле) равен $\rho_A \otimes \rho_B$, а после взаимодействия (гейта) \hat{U} :

$$\hat{U}(\hat{\rho}_A \otimes \hat{\rho}_B)\hat{U}^\dagger.$$

Дойч изучил ряд известных временных парадоксов и ввел условие согласования, записываемое в виде операторов плотности

$$\hat{\rho}_B = Tr_A[\hat{U}(\hat{\rho}_A \otimes \hat{\rho}_B)\hat{U}^\dagger]. \quad (4)$$

Условие согласования требует, чтобы оператор плотности младшей версии частицы, когда она покидает область взаимодействия, был таким же, как у более старой версии, когда та входит в область взаимодействия (входит в петлю).

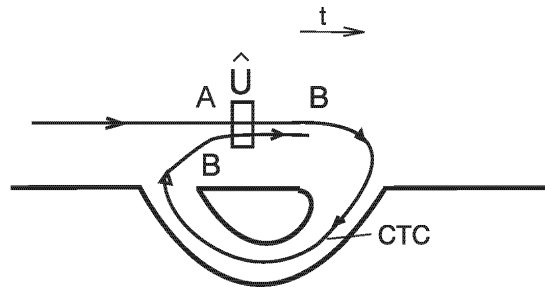


Рис. 3. СТС в 4-мерной кротовой норе в пространстве-времени.

Частица B входит в СТС, что означает, что она нарушает хронологию, поскольку идет в прошлое – обозначим ее оператор плотности как ρ_{CTC} , а частица A живет в правильной хронологии – живет своей жизнью (рис. 3), поэтому условия согласование лучше переписать в виде

$$\hat{\rho}_{CTC} = Tr_A[\hat{U}(\hat{\rho}_A \otimes \hat{\rho}_{CTC})\hat{U}^\dagger]. \quad (5)$$

Доказано, что состояние $\hat{\rho}_B = \hat{\rho}_{CTC}$, удовлетворяющее уравнению (4), всегда существует. Другими словами, в машине времени D-СТС эффективно реализуется принцип самосогласованности Новикова, гласящий, что при перемещении в прошлое вероятность действия, изменяющего уже случившееся с путешественником событие, т. е. до его путешествия в прошлое, стремится к нулю.

2. Парадокс дедушки. Рассматривается состояние

$$|\text{молодой}\rangle|\text{настоящий}\rangle$$

(гейтов), вычислительные шаги которых синхронизированы во времени (рис. 2). Гейт представляет собой унитарный оператор в гильбертовом пространстве, состоящем из m -разрядных кубитов $|x_1\rangle \otimes \dots \otimes |x_m\rangle$ [11].

где $|молодой\rangle$ – состояние молодого Я в прошлом и $|настоящий\rangle$ – мое настоящее, и гейт:

$$\hat{U} : |x\rangle|y\rangle \rightarrow |x \oplus y\rangle|y\rangle, \quad x, y \in Z_2,$$

которое дает состояние системы на выходе из СТС.

Считаем, что $x, y = 0$ – человек мертв, $x, y = 1$ – жив.

Парадокс дедушки возникает при $x = 1, y = 1$:

$$\hat{U} : |1\rangle|1\rangle \rightarrow |0\rangle|1\rangle,$$

поскольку данное преобразование означает, что убийство молодого Я мной настоящим, путешествуя в прошлое, тем не менее оставляет меня живым по возвращению!

Дойч вводит условие согласования

$$x \oplus y = y,$$

выполнимое только при $x = 0$. Тогда имеем преобразование

$$\hat{U} : |0\rangle|y\rangle \rightarrow |y\rangle|y\rangle,$$

которое следует рассматривать лишь для $y = 0$, поскольку коль молодой мертв, то и Я настоящий мертв.

Аналогично в терминах квантовых сетей моделируются другие временные парадоксы.

4.2. Квантовая машина времени Светличного-Ллойда

Примером макроскопического проявления эффектов квантовой механики является квантовая телепортация – передача квантовых состояний на расстояние. Так, в Китае осуществили квантовую телепортацию между космосом и Землей на расстояние более 1200 километров [24].

Беннетт и Шумахер [17] предложили альтернативную, неэквивалентную, отличную от D-СТС, формулировку модели квантовой машины времени с использованием квантовой телепортации. Работа не была опубликована.

В 2009 году Светличный⁵ (Svetlichny) [18] развил эти идеи и предложил использовать протокол квантовой телепортации для реализации квантовой сети с обратными связями во времени для (вероятностного) моделирования временных петель (СТС).

В качестве примера возможностей предложенной им квантовой машины времени Светличный рассмотрел известный парадокс дедушки и заявил, что видимое как парадокс в классической теории, перестает быть таковым при использовании аппарата квантовой механики: вероятностный характер процессов разрешает любой парадокс.

1. Квантовая телепортация. Изучим механизм квантовой телепортации. Пусть Алиса обладает частицей 1, находящейся в (неизвестном) квантовом состоянии, описываемом кубитом

$$|\psi\rangle_1 = c_1|0\rangle_1 + c_2|1\rangle_1, \quad (6)$$

где индекс 1 помечает частицу 1. Алиса не может переслать Бобу свою частицу, у нее нет возможности переслать частицу 1 как физическую материальную вещь. Тогда остается только одно – сообщить Бобу информацию о квантовом состоянии частицы 1, т. е. передать состояние кубита (6).

Рассмотрим четырехмерное гильбертово пространство \mathcal{H}^4 всех 2-кубитов, состоящее из тензоров вида

$$|x\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle.$$

⁵George Svetlichny – американский физик. Получил степень доктора философии в Принстонском университете. Специалист в области квантовой физики, общей теории относительности и квантовой гравитации. В настоящее время полный профессор Pontifícia Universidade Catylica do Rio de Janeiro, Бразилия.

Однако можно задать ортонормированный базис в \mathcal{H}^4 из четырех сцепленных состояний Белла:

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|00\rangle + |11\rangle], \quad |\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|00\rangle - |11\rangle], \quad (7)$$

$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|01\rangle + |10\rangle], \quad |\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|01\rangle - |10\rangle] \quad (8)$$

– базис Белла, и тогда любое 2-кубитовое чистое квантовое состояние представимо в виде

$$|x\rangle = \beta_{00}|\Phi^+\rangle + \beta_{01}|\Psi^+\rangle + \beta_{11}|\Psi^-\rangle + \beta_{11}|\Phi^-\rangle.$$

Шаг 1. Мы предполагаем, что Алиса и Боб имеют в распоряжении соответственно частицу 2 и частицу 3, находящиеся в сцепленном⁶ (запутанном) состоянии. Для определенности скажем: это 2-кубит

$$|\Psi^+\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}}[|0\rangle_2|1\rangle_3 + |1\rangle_2|0\rangle_3], \quad (9)$$

где индексы 2,3 помечают частицы 2 и 3. Данный 2-кубит предоставлен заранее некоей третьей стороной, способной создавать сцепленные состояния.

Шаг 2. Квантовое состояние системы из всех трех частиц 1,2 и 3 имеет вид

$$|\psi\rangle_{123} = |\psi\rangle_1 \otimes |\Psi^+\rangle_{23}$$

и может быть записано в виде разложения по состояниям Белла:

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_{123} = \frac{1}{2} [& |\Psi^-\rangle_{12}(-c_1|0\rangle_3 - c_2|1\rangle_3) + |\Psi^+\rangle_{12}(-c_1|0\rangle_3 + c_2|1\rangle_3) + |\Phi^-\rangle_{12}(c_1|1\rangle_3 + c_2|0\rangle_3) + \\ & + |\Phi^+\rangle_{12}(c_1|1\rangle_3 - c_2|0\rangle_3)]. \end{aligned} \quad (10)$$

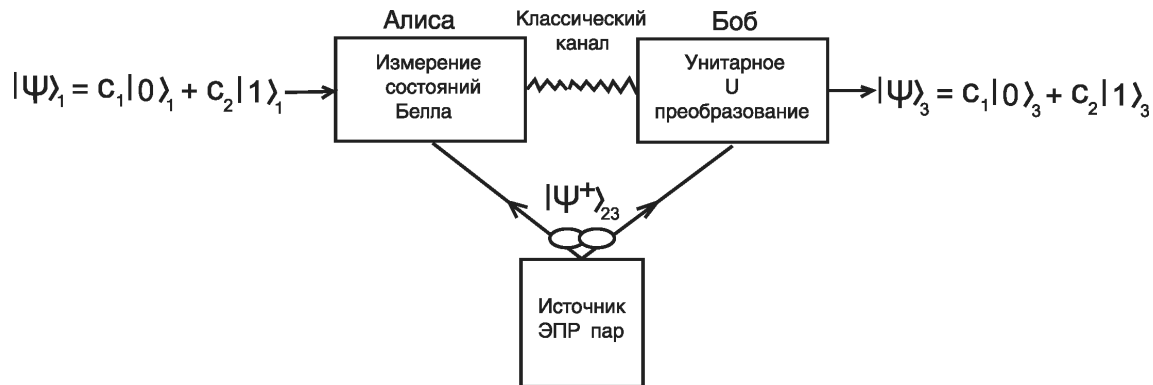


Рис. 4. Схема квантовой телепортации.

Шаг 3. На этом шаге Алиса проводит измерение (белловских) состояний частиц 1 и 2, т. е. применит к состоянию один из операторов проектирования:

$$|\Psi^-\rangle_{12} \langle\Psi^-|, \quad |\Psi^+\rangle_{12} \langle\Psi^+|, \quad |\Phi^-\rangle_{12} \langle\Phi^-|, \quad |\Phi^+\rangle_{12} \langle\Phi^+|.$$

Допустим, что применяется третий оператор:

$$|\Phi^-\rangle_{12} \langle\Phi^-|. \quad (11)$$

Тогда

$$|\Phi^-\rangle_{12} \langle\Phi^-|(|\psi\rangle_{123}) = |\Phi^-\rangle_{12} \otimes \frac{1}{2}[c_1|1\rangle_3 + c_2|0\rangle_3].$$

⁶Сцепленная пара часто называется ЭПР-парой.

Это означает, что сразу *после измерения* в силу квантовой корреляции частица 3, находящаяся у Боба, оказывается в состоянии

$$c_1|1\rangle_3 + c_2|0\rangle_3.$$

Шаг 4. Алиса по классическому каналу связи (по email) сообщает Бобу, какой оператор проектирования она применяла.

Шаг 5. Боб, узнав от Алисы об использованном операторе проектирования, применяет к своей частице 3 унитарное преобразование \hat{U} , а точнее, одно из четырех $\hat{I}, \hat{\sigma}_1, i\hat{\sigma}_2, \hat{\sigma}_3$, отвечающих одному из использованных операторов проектирования⁷. В данном случае это следующее преобразование $\hat{U} = \hat{\sigma}_1$:

$$\hat{U}[c_1|1\rangle_3 + c_2|0\rangle_3] = c_1|0\rangle_3 + c_2|1\rangle_3.$$

Совершение унитарного преобразование – это прогонка кубита через некоторый гейт, т. е. он подвергается некоторому (физического) воздействию. В результате частица 3 принимает исходное квантовое состояние частицы 1, что и хотела сделать Алиса. Телепортация завершена.

Удивительно то, что частица 3 из сцепленной пары 23 фактически «превращается» в частицу 1.

Телепортация происходит мгновенно. В этом процессе квантовая информация перемещается от Алисы к Бобу.

2. Эффективная машина времени. Машина времени проявляется, если изначально сцепить (запутать) частицы 2 и 3 в форме

$$|\Phi^+\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}} [|0\rangle_2|0\rangle_3 + |1\rangle_2|1\rangle_3]. \quad (12)$$

Тогда преобразование Боба \hat{U} будет тождественным, т. е. $\hat{U} = I$. В этом случае Бобу не нужно выполнять никаких преобразований для получения состояния Алисы $|\psi\rangle_1$. В некотором смысле Боб обладает неизвестным состоянием частицы 1 **даже до того, как Алиса осуществит телепортацию**, т. е. сделает шаг 3 с оператором проектирования

$$|\Phi^+\rangle_{12} \langle\Phi^+|. \quad (13)$$

Следствие имеет место во времени до появления причины! Частица 3 в данном случае может рассматриваться как частица 1, вернувшаяся назад в прошлое. Более того, независимо от того, что Алиса могла бы делать с частицей 2, сцепленная с ней частица 3 упорно сохраняет в прошлом по отношению к времени махинаций Алисы в будущем состояние частицы 1.

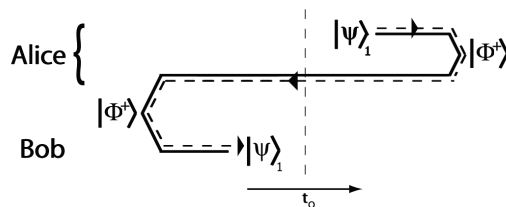


Рис. 5. Когда результат измерения телепортации совпадает с состоянием Белла сцепленной пары 23 в состоянии ввода, тогда частица 3 Боба должна находиться в состоянии $|\psi\rangle$ прежде, чем Алиса решила его телепортировать. Это порождает мысль о том, что кубит путешествует во времени с помощью измерения Белла и ЭПР-пары Белла. Пунктирная линия со стрелкой представляет временной поток во временной системе отсчета кубита; от момента образования ЭПР-пары до измерения время кубита течет против времени внешнего наблюдателя (t_0). Однако эта интерпретация зависит от результата измерения, поэтому следует говорить об «условном перемещении назад во времени» [22]

⁷ I – тождественный оператор, $\hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\sigma}_3$ – матрицы Паули.

Но причинность не нарушается потому, что Боб не может предвидеть результат выбора Алисы, который является абсолютно случайным, поскольку Алиса могла выбрать не оператор (14), а любой другой из трех оставшихся операторов проектирования:

$$|\Phi^-\rangle_{12} {}_{21}\langle\Phi^-|, |\Psi^+\rangle_{12} {}_{21}\langle\Psi^+|, |\Psi^-\rangle_{12} {}_{21}\langle\Psi^-|, \quad (14)$$

Следовательно, телепортация состоится в 1/4 случае всех попыток (а в 3/4 на выходе будет не та частица, которую хотели телепортировать, а просто исходная частица, используемая в сцепленной паре частиц 2,3 и испущенная ЭПР-источником, который создает такие пары).

Учитывая это обстоятельство Сет Ллойд дополнил эффективную машины времени пост-селекцией (postselection) Ааронова-Бергмана-Лебовица [15], суть которого состоит в том, что проведя серию попыток, мы из всех выходных результатов отбираем только те, которые соответствуют одному из четырех возможных результатов измерений Алисы (в нашем примере это $|\Phi^+\rangle$). О том, что путешествие во времени состоялось, мы узнаем постфактум⁸. Сет Ллойд назвал этот механизм проективным, а эффективную машину времени *пост-селективными* временными петлями (СТС), или Р-СТС» [20, р. 2].

В Р-СТС используется стандартная схема телепортации, но при отсутствии классического канала связи Алисы с Бобом.

Р-СТС-машина времени представляет собой идеальный квантовый канал для передачи квантового состояния в прошлое. Более того, Р-СТС-машина времени работает в пространстве-времени, не требуя существования в нем общерелятивистских временных петель (СТС) и является квантовым аналогом машины времени Гёделя.

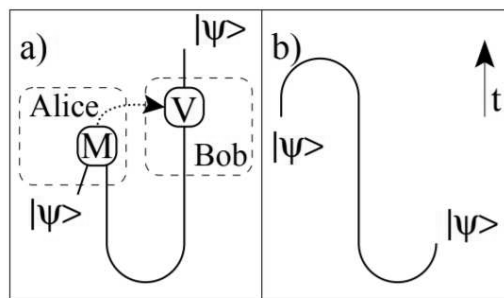


Рис. 6. Описание замкнутых времениподобных кривых посредством телепортации: а) обычная телепортация: Алиса и Боб начинают из общего запутанного состояния Белла, изображенного в виде \cup . Алиса выполняет измерение Белла M на ее половине общего состояния системы и с неизвестным квантовым состоянием $|\psi\rangle$, которое она хочет передать Бобу. Это измерение говорит ей, в каком запутанном состоянии находятся две подсистемы. Затем она сообщает (пунктирная линия) результат измерения Бобу, который выполняет гейт \hat{U} на его половине запутанного состояния, получив начальное неизвестное состояние $|\psi\rangle$. б) пост-селекционная телепортация: подсистема Алиса в состоянии $|\psi\rangle$ и ее половина состояния Белла \cup проецируются с помощью того же состояния Белла \cap . Это означает, что часть состояния Белла, находящаяся у Боба, проецируется в исходное состояние $|\psi\rangle$ подсистемы Алисы еще до того, как это состояние станет доступным [20].

Сделаем три важных замечания:

1) в своих измерениях (шаг 3, (11)) Алиса не получает никакой информации о телепортируемом состоянии: во время телепортации коэффициенты c_1 и c_2 остаются неизвестными. Иначе говоря, состояние частицы 1, которой она располагала, остается для Алисы неизвестным. Алиса всего лишь передала Бобу *само квантовое состояние* своей частицы 1. Более того, Боб, поскольку он не производил никаких измерений, также ничего не знает о новом состоянии своей частицы 3.

⁸Частное сообщение С.М. Коротаева.

2) квантовая машина времени Светличного передает в прошлое только информацию, и никоим образом физической материальной объект.

3) эксперименты на квантовом информационном процессоре ЯМР в жидком состоянии, проведенные Лафорестом, Баухом и Лафламме, согласуются с интерпретацией, что информация может рассматриваться как текущая назад во времени через сцепление (запутывание) [22].

В случае ЭПР-пары (12) мы имеем *эффективное путешествие во времени*. Ведь, после того как измерение Алисы (шаг 3) имело место, нет никакого эмпирического способа фальсифицировать, т. е. экспериментально опровергнуть утверждение⁹, что кубит Алисы действительно возвратился назад во времени к Бобу¹⁰. Но Светличный отмечает, что «это не истинное путешествие во времени. К истинному путешествию во времени я отношу такое, чье отрицание может быть сфальсифицировано эмпирическими данными. Можно однако спросить, существуют ли в случае предложенной машины времени какие-либо предполагаемые эффекты и преимущества предполагаемого путешествия во времени. Удивительный ответ – да, но, очевидно, только те, которые не приводят к парадоксам путешествий во времени. Парадоксы путешествия во времени, о которых говорят, – это просто прочтение ситуаций, которые могут быть проанализированы в обычных квантовомеханических терминах» [18].

3. Парадокс дедушки. В качестве примера рассматривается известный парадокс с убийством дедушки.

Путешественник-убийца входит в петлю в суперпозиции $|\psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, где $|0\rangle$ – он мертв и стало быть безвреден (можно также трактовать это как жив, но не способен на убийство), а $|1\rangle$ – он жив и фатально вреден. В частности, возможны и классически определенные состояния $|0\rangle$ или $|1\rangle$.

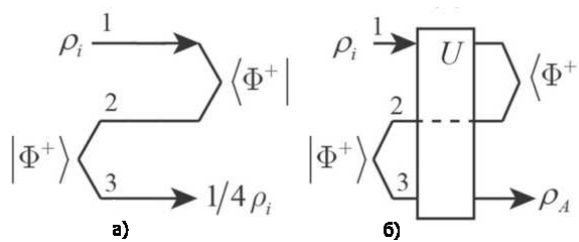


Рис. 7. а) телепортация в прошлое; частица 1 в состоянии $\hat{\rho}_1$ превращается в частицу 3 в неолчимом от $\hat{\rho}_1$ состоянии ; б) унитарный оператор $\hat{U} = \widehat{CNOT}$, действующий на путешественника 1 и дедушку 3; на выходе состояние ρ_A [12]

Матрица плотности для путешественника нв входе в P-CTC

$$\hat{\rho}_1 = |\psi\rangle\langle\psi|,$$

$$\hat{\rho}_1 = \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \alpha\bar{\beta} \\ \bar{\alpha}\beta & |\beta|^2 \end{pmatrix}$$

Гейт $\hat{U} = \widehat{CNOT}$ описывает встречу путешественника со своей ранней версией (дедушкой), причем

⁹Фальсификация (лат. falsus – ложный и facio – делаю) – научная процедура, имеющая своим результатом установление ложности соответствующей гипотезы посредством эмпирической проверки на соответствие экспериментальным данным или теоретической проверки на соответствие принятым в научном сообществе фундаментальным теориям.

¹⁰Кубит Алисы – частица 1 – после измерения (11) теряет свое исходное состояние (6), т. к. сцепляется (перепутывается) с частицей 2. Это происходит в полном соответствии с теоремой о запрете клонирования квантового состояния.

путешественник – это управляющий сигнал:

$$\hat{U} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Вероятность прохождения Р-СТС равно [12]:

$$p_{tr}(\rho_1) = Tr \hat{\rho}_A,$$

где $\hat{\rho}_A$ – состояние на выходе из Р-СТС,

$$\hat{\rho}_A = Tr_{12}[(\hat{U}\hat{\rho}_1 \otimes |\Phi^+\rangle_{12} \langle\Phi^+| \hat{U}^\dagger)](|\Phi^+\rangle_{1221} \langle\Phi^*| \otimes I)$$

и I – единичная матрица 2×2 .

Если путешественник принял состояние $|0\rangle$, то он мертвый, и значит безвреден. Поэтому состояние дедушки не изменяется. Если путешественник принял состояние $|1\rangle$, то он жив и способен к убийству: состояние дедушки $|1\rangle$ меняется на $|0\rangle$ (а состояние дедушки $|0\rangle$ на $|1\rangle$). То есть если дедушка был определенно жив ($|1\rangle$), то он становится определенно убитым ($|0\rangle$).

Выходное состояние системы, т. е. на выходе из Р-СТС

$$\hat{\rho}_A = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 2(Re \alpha \bar{\beta})^2 \\ 2(Re \bar{\alpha} \beta)^2 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}.$$

В случае представления в терминах углов на сфере Блоха

$$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} e^{-\frac{i\phi}{2}} |0\rangle + \sin \frac{\theta}{2} e^{\frac{i\phi}{2}} |1\rangle.$$

Поэтому

$$p_{tr} = \frac{1}{2} |\alpha|^2 = \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2}.$$

и

$$\tilde{\rho}_A = (p_{tr})^{-1} \rho_A = |+\rangle \langle +|$$

–нормализованная матрица плотности.

Результат С.М. Коротаева и Е.О. Киктенко [12] говорит в том, что вероятность прохождения p_{tr} через путешественником петли Р-СТС зависит от соотношения амплитуд α и β . Если $\alpha = 1, \beta = 0$, т. е. путешественник не жив и, значит, не способен к убийству, то вероятность прохождения Р-СТС максимальна ($1/2$). Если $\alpha = 0, \beta = 1$, т. е. путешественник живой, то вероятность прохождения через Р-СТС нулевая.

Таким образом, Р-СТС запрещает живому внуку ходить в прошлое, предотвращая парадоксальный случай. Парадокс дедушки разрешается через пропускную способность временной петли – убийцу она просто не пропускает.

Удивительно, что для всех начальных состояний на входе в Р-СТС состояние на выходе из Р-СТС всегда находится в когерентной суперпозиции

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle + |0\rangle)$$

«живого» и «мертвого» путешественника во времени.

4. Эксперименты Ллойда и Стейнберга. Ллойд¹¹ и др. смоделировали парадокс дедушки для машины времени Светличного, отправив фотон назад во времени, чтобы «убить» себя. Обычная

¹¹Сет Ллойд (Seth Lloyd)– профессор Массачусетского технологического института. Предложил схему первого технологичного квантового компьютера.

квантовая телепортация гарантированно даст нам копию состояния, которое вы намереваетесь отправить. Стейнберг и Ллойд хотели знать, сработает ли это для фотонов, намеревающихся убить себя квантовым пистолетом.

Для работы созданного ими симулятору потребовалось две дополнительные функции: квантовый пистолет, который иногда стреляет, и средство для самой телепортации.

Вместо запутывания двух фотонов запутывались два атрибута одного фотона: поляризация $p = 0, 1$ фотона будет представлять «настоящее» фотона, а его направление $d = 0, 1$ – «прошлое»

$$|\text{настоящее}\rangle|\text{прошлое}\rangle,$$

$$|\psi\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|p=0\rangle|d=1\rangle + |p=1\rangle|d=0\rangle).$$

В качестве пистолета брали волновую пластину, которая может изменять поляризацию фотона или оставлять ее неизменной. Убийство рассматривается как обнуление кубита $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$, где $|1\rangle$ – «живой» кубит, $|0\rangle$ – «мертвый». Поскольку поляризация и направление фотона запутаны, предоставление фотону такого оружия влияет на «прошлое».

Была также смоделирована ситуация, когда телепортация иногда терпела неудачу.

Серии экспериментов показали нечто интересное: каждый раз, когда путешествие во времени реализуется, пистолет не стреляет. И когда путешествие во времени не удается, пистолет работает. На языке дедушкиного парадокса это означает, что до тех пор, пока есть вероятность того, что ваш пистолет не выстрелит и убийство не удастся, путешествие во времени может реализоваться. «Вы можете навести пистолет, но не сможете нажать на курок, – говорит Ллойд».

Для усиления эффекта срабатывания пистолета, т. е. волновой пластины, ее сделали вращающейся на угол от 0 (фотон-путешественник промахивается) до 180 градусов (точное попадание).

По мере того, как точность настройки пистолета увеличивается (по горизонтали, градусы от нуля до 180), вероятность телепортации уменьшается. Вероятность же того, что пара пробных кубитов найдена в состоянии 10 или 01 составляет в районе 0,01. Это свидетельствует о том, что фотон никогда не добьется успеха в путешествии назад во времени с убийством самого себя.

Иначе говоря, о чем ближе к парадоксальному состоянию физики подводили всю систему, тем реже удавался опыт. Отсюда был сделан вывод, что путешествия во времени могли бы иметь сходный естественный «предохранитель», не позволяющий совершить убийство дедушки.

Таким образом, экспериментально показано, что путешественник, пользующийся квантовой машиной Р-СТС Светличного, не может убить дедушку. Какое это может иметь отношение к реальным путешествиям в прошлое? Светличный пишет: «рассмотренная ситуация происходит в контексте физически реализуемого процесса телепортации и поэтому не может привести к какому-либо противоречию» [18, р. 5].

5. Передача информации в прошлое [25]. Пока мы показали, как в прошлое передать неизвестное квантовое состояние $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. В принципе, это не дает возможности слать конкретные сообщения.

И тем не менее, покажем, как передать сообщение $|1\rangle_A$.

Пусть Алиса и Боб обладают парой

$$|\psi\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_B|1\rangle_A + |1\rangle_B|0\rangle_A).$$

Р-СТС задается сцепленным 2-кубитом, реализованный на двух частицах 1 и 2:

$$|\phi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2 + |1\rangle_1|1\rangle_2).$$

Формируем состояние

$$|\psi\rangle_{AB} \otimes |\phi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_B|1\rangle_A + |1\rangle_B|0\rangle_A) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2 + |1\rangle_1|1\rangle_2).$$

Применяем к этому состоянию гейт \widehat{CNOT}_{A1} по частицам $A, 1$:

$$\widehat{CNOT} : |xy\rangle \rightarrow |x(x+y)\rangle.$$

Получаем

$$\widehat{CNOT}_{A1}(|\psi\rangle_{AB} \otimes |\phi\rangle_{12}) = \frac{1}{2}|0\rangle_B|1\rangle_A \otimes (|1\rangle_1|0\rangle_2 + |0\rangle_1|1\rangle_2) + \frac{1}{2}|1\rangle_B|0\rangle_A \otimes (|0\rangle_1|0\rangle_2 + |1\rangle_1|1\rangle_2).$$

Пропустим это состояние через гейт \widehat{SWAP}_{A2} :

$$\begin{aligned} \widehat{SWAP}|00\rangle &= |00\rangle, \quad \widehat{SWAP}|01\rangle = |10\rangle, \quad \widehat{SWAP}|10\rangle = |01\rangle, \quad \widehat{SWAP}|11\rangle = |11\rangle, \\ \widehat{SWAP}_{A2}\{\widehat{CNOT}_{A1}(|\psi\rangle_{AB} \otimes |\phi\rangle_{12})\} &= \\ &= \frac{1}{2}|0\rangle_B|0\rangle_A \otimes |1\rangle_1|1\rangle_2 + \frac{1}{2}|0\rangle_B|1\rangle_A \otimes |0\rangle_1|1\rangle_2 + \frac{1}{2}|1\rangle_B|0\rangle_A \otimes |0\rangle_1|0\rangle_2 + \frac{1}{2}|1\rangle_B|1\rangle_A \otimes |1\rangle_1|0\rangle_2. \end{aligned}$$

Алиса проецирует часть этого тензора, относящуюся к частицам $A, 1$, на $|\phi\rangle_{A1}$, т. е. применяет оператор

$$|\phi\rangle_{A1} \langle\phi|$$

Получается $|1\rangle_B|0\rangle_2$. Иначе говоря, Боб получил сигнал 1.

Аналогично передается в прошлое сигнал 0. Имея возможность передавать 0 и 1, мы можем передавать любое сообщение закодированное в алфавите $\{0, 1\}$. Иначе говоря, можно наладить передачу телеграфных сообщений в прошлое. Впервые о такой возможности заявил Ральф [26].

6. Телепортация человека в прошлое. Можно ли с помощью машины времени Светличного отправить человека в прошлое?

Квантовая телепортация, упомянутом выше, требует подготовки специальных пар сцепленных систем, которые должны соединить две пространственные области. Необходимы будут технологические аппараты, приспособленные к особенности телепортируемых объектов и выполнению ряда операций, которые приведут их к особому рода уничтожению и восстановлению в месте назначения.

Но скорее всего мы научимся технически телепортировать сложные квантовые объекты.

Сложным объектом является и человек. «Есть около 10^{29} частиц материи, составляющих человека, каждая из которых имеет в дополнение к вращению степени свободы положения и импульса. В принципе, нам также может понадобиться телепортировать фотоны, глюоны и другие частицы энергии, составляющие человека. Телепортировать все, что будет значительно сложнее, чем несколько тысяч вращений. Вероятно, это хорошее предположение, что телепортация людей никогда не будет возможна» [28].

Наконец, квантовая телепортация, какой мы ее сейчас знаем, телепортирует квантовые объекты. Может ли человек быть описан как квантовый объект? Мы в этом не уверены: для нас сегодня человек – классический объект, т. е. мы не знаем, может ли человек быть описан как квантовый объект, информация о котором может быть телепортирована. Но мы и опасаемся заявить, что это невозможно, поскольку открытие ЭПР-пар Эйнштейном, Подольским и Розеном долго воспринималось как квантовый парадокс, а сегодня мы знаем о квантовой сцепленности макрообъектов. Скорее всего дело в неразвитости определенных разделов квантовой механики. И вполне возможно, что необходимый аппарат макроскопической квантовой механики появится в ближайшем будущем.

Наконец, современная физика не умеет также описывать душу, сознание или дух, который пронизывает человеческое тело. Поэтому мы совершенно не можем обратиться к науке для определения возможности безопасной квантовой телепортации человека.

4.3. Квантовая AAPV-машина времени

Квантовые частицы, как известно, допускают волновое описание. Поэтому они квантово интерферируют. Идея использовать квантовую интерференцию для *реальных физических переходов назад во времени* впервые была изложена в статье Ааронова, Анандана, Попеску и Вайдмана в 1990-м году [7,8]. В ней рассуждения основываются на использовании эффекта замедления времени для отраженного фотона при его движении в гравитационном поле и образующего суперпозицию с исходным фотоном, движущимся прямо вне гравитационного поля.

Речь идет об известном эксперименте пропускания фотона через полупрозрачное зеркало. Появляются два фотона, которые составляют квантовую суперпозицию и интерферируют друг с другом. В общем случае рассматривается суперпозиция эволюционирующих различных состояний системы, отличающихся степенью замедления времени, достигнутой за счет гравитационного поля. Рассматривая ситуацию, когда этих состояний порядка 10000, устанавливается, что средней эффект замедления времени для системы относительно времени внешнего наблюдателя намного больше, чем для каждого отдельного состояния. Измерение состояния системы обнаруживает его с некоторой вероятностью таким, каким оно было в прошлом. Это устройство назовем *AAPV-машиной времени* по первым буквам фамилий авторов статьи [7].

В какой-то мере, это квантовая вариация машины времени Торна, эффективность которой крайне сомнительна [3]. Но в отличие от машины времени Торна, которую считают устройством для путешествия людей в прошлое, квантовая AAPV-машина времени для этого не предназначена. AAPV-машина – работает в рамках пространства-времени и остается в нем, в отличие от негёделевской машины времени, описанной в § 5.5.

4.4. Квантовая машина времени Эндрю Грея

В 1998 году Эндрю Грей представил схему работы квантовой машины времени [29], отправляющего реальные частицы назад во времени. Его машина времени опирается на разработанную им интерпретацию квантовой механики «Отбор историй» [31], приписывающей каждой истории частицы вероятность, зависящую от всех моментов времени, как прошлых, так и будущих.

Эта схема вызвала как возражения, так и конструктивные улучшения. Однако версия статьи Грея 2004 года [30] в архиве, была изъята, как написано, «по понятным соображениям». Не ясно, кто это мог сделать. Анализ схемы Грея требует анализа физика-экспериментатора, каковым автор не является.

В многомировой квантовой теории Эндрю Грея, в квантовых системах [29,31], полные космические истории отбираются по всему пространству и времени с вероятностью отбора, присвоенной каждой возможной истории. Поскольку эта вероятность зависит от всей истории, а не просто складывается из произведения вероятностей для каждого шага в истории, теория не является каузальной теорией. Грей показывает, что это нарушение причинности обычно совершенно ненаблюдаемо в микромире, но возможно наблюдение в макромире.

4.5. Не-Гёделевская квантовая машина времени

Рассмотренные проекты квантовой машины времени не отправляют самого человека в прошлое. Однако в них говорится о том, что для временных переходов нет необходимости обращаться к машине времени Гёделя. Следует строить принципиально иную – не-Гёделевскую квантовую машину времени. Очевидно, что для описания работы механизма макроскопической машины времени, работающей за счет квантовых эффектов, мы должны отойти от аппарата ОТО и воспользоваться аппаратом квантовой механики. Однако, хотя квантовая механика и является аппаратом, как для описания микромира, так и для макромира, у нас нет необходимо опыта создания квантовомеханического описания макроявлений.

Тем не менее, можно попытаться делать такие описания [32, 33], обращаясь к подходящих

по смыслу квантовым теориям. В нашем случае, поскольку нужно перебрасывать макроскопический аппарат, именуемый машиной времени из одной области пространства-времени в другую (прошлую), а точнее, обращаясь к языку историков, из настоящей исторической эпохи в прошлую историческую эпоху, то стоит обратиться к аппарату квантовой геометродинамики, созданный Уилером.

Аппарат квантовой геометродинамики Уилера [34] описывает не только эффекты квантовой гравитации, но и является способом квантового описания Вселенной. В статье мы обращаем внимание на возможность с помощью этого аппарата выявить наличие возможных переходов между различными временными сечениями (эпохами) пространства-времени.

Пространство-время Вселенной M^4 в квантовой космологии Уилера-ДеВитта появляется как интерференция когерентной квантовой суперпозиции, или волнового пакета:

$$\Psi[{}^{(4)}\mathcal{G}] = \int_K c_k \Psi_k[{}^{(3)}\mathcal{G}] d\mu(k), \quad c_i \in \mathbb{C}, \quad (13)$$

где $\Psi_k[{}^{(3)}\mathcal{G}]$ – частная волновая функция, являющаяся функционалом от 3-мерной римановой геометрии ${}^{(3)}\mathcal{G} = (M^3, h_{\alpha\beta})$ и удовлетворяющая функциональному уравнению Уилера-ДеВитта.

Мы видим, что то, что считается Реальностью, существующей в *форме* четырехмерного непрерывного континуума M^4 и называемого пространством-временем, в действительности является квантовой сущностью, т. е. цепью интерференционных «горных пиков» по выражению Halliwell’a [35] в суперпространстве Уилера. Вдоль этой цепи «горных пиков» вводится искусственно расстояние между ними «пиками» – воспринимаемое людьми как *физическое время* t . Поэтому имеем семейство 3-геометрий ${}^{(3)}\mathcal{G}(t)$, или 3-метрики $h_{\alpha\beta}(x, t)$, удовлетворяющих уравнениям Эйнштейна. Рассматривая волновую функцию $\Psi[h_{\alpha\beta}(x, t)] = \Psi[{}^{(3)}\mathcal{G}(t)]$ и полагая

$$\begin{aligned} \Psi[h_{\alpha\beta}(x, t)] &= \psi[h_{\alpha\beta}(x, t)] e^{im_P S[h_{\alpha\beta}(x, t)]}, \\ \psi(t) &= \psi[h_{\alpha\beta}(x, t)], \\ \frac{\partial}{\partial t} \psi(t) &= \int \dot{h}_{\alpha\beta}(x, t) \frac{\delta}{\delta h_{\alpha\beta}(x, t)} \psi[h_{\alpha\beta}(x, t)] d^3x, \end{aligned}$$

где $S[h_{\alpha\beta}]$ – решения уравнения Эйнштейна-Гамильтона-Якоби, m_P – масса Планка, и

$$\dot{h}_{\alpha\beta} = NG_{\alpha\beta\gamma\delta} S[h_{\gamma\delta}] + 2D_{(\alpha} N_{\beta)},$$

находим, что вдоль пространства-времени, т. е. вдоль цепи «горных пиков» справедливо уравнение Шрёдингера

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(t) = H_{mat} \psi(t), \quad (14)$$

где H_{mat} – гамильтониан материальных полей (подробности см. [36, p. 172]).

Как правило, не обсуждается смысл квантовой системы Ω , описываемой посредством волнового пакета (13), и ее состояний Ω_k , $k \in K$, для которых находятся соответствующие волновые функции $\Psi_k[{}^{(3)}\mathcal{G}]$.

Очевидно, что Ω – это Внешний мир, Квантовая реальность, а ее состояния Ω_k – это формы ее существования, которые в соответствии с принципами квантовой механики в процессе, именуемом в квантовой механике *измерением*, локализируются. Измерение системы Ω приводит к коллапсу волнового пакета (13):

$$\int_K c_k \Psi_k[{}^{(3)}\mathcal{G}] d\mu(k) \rightarrow \Psi_{k'}[{}^{(3)}\mathcal{G}] \quad (15)$$

с вероятностью $|c_{k'}|^2$. Правда, совершенно непонятно, кто и где будет совершать измерение и наблюдать локализацию состояния $\Omega_{k'}$? Ведь для Вселенной не существует внешнего наблюдателя.

Квантовая механика исходит из того, что система Ω находится внутри 3-мерного мира, в котором течет физическое время t , и именно в нем происходят измерения состояний системы Ω . В нем же наблюдаются локализации состояний Ω_k . Этот 3-мерный мир и является собой внешнее окружение системы Ω .

В случае квантовой космологии для системы Ω не существует внешнего окружения; она изолирована. Как же произвести измерение состояния Ω_k системы Ω ?

Во время измерения у самой системы, которая в нашем случае – это Вселенная, появляются классические черты, которые соответствуют информации, имеющейся в окружающей среде, роль которой играет наблюдатель, производящий измерение с помощью приборов. При этом существенную роль играет макроскопичность прибора, существующего в пространстве и времени. Однако для состояния, к которому редуцирует волновой пакет, нет того внешнего параметра, который вводится вдоль «горных пиков», отмечающих классическую траекторию в суперпространстве, соответствующую классическому пространству-времени. Следовательно, существование состояния происходит стационарным образом, в его пространстве ничего не меняется в его времени, и это время есть время, текущее в сознании наблюдателя.

1. Исторические эпохи. Примем, что каждое состояние Ω_k квантовой реальности Ω – это 3-мерный мир, в котором практически ничего не меняется; он вневременен. В этом мире находится *наблюдатель*, способный осуществлять измерения реальности, точнее, ее пространственной геометрии. Иначе говоря, Ω_k – это стационарное пространство-время M_k^4 , в котором осуществляется «замороженное» историческое существование наблюдател(я/ей). Историки такое существование называют историческими эпохами. Гёте и Шпенглер использовали термин «гештальт» [37].

Каждая историческая эпоха, такая как Античность, Средневековье, Возрождение и пр., видится историками как *ограниченная* во времени форма существования человечества.

Историческая эпоха – наиболее крупная единица исторического времени, обозначающая длительный период человеческой истории, отличающийся определенной внутренней связностью и только ему присущим уровнем развития материальной и духовной культуры ... Переход от одной эпохи к другой представляет собой переворот во всех сферах социальной жизни [Философский словарь].

Конечность исторической эпохи автоматически означает ее сменяемость, а значит дает возможность все исторические эпохи разместить одну за другой, **последовательно** в одном пространственно-временном лоренцевом многообразии. В этом описании отражена западная культурная традиция видеть Мир изменяющейся сущностью, эволюционирующей в физическом времени t .

Ну..., а вдруг исторические эпохи не конечны во времени? И если не пытаться их втолкнуть в одно пространство-время, полагая, что ее бесконечность во времени проявляется всего лишь в форме редких, но устойчивых «пережитков» прошлого? В таком случае, очевидным становится, что сильно доминирующие нередкие «пережитки» прошлого будут заполнять все будущее, разрушая идею сменяемости исторических эпох, идею эволюционирующей реальности.

Как спасти идею последовательной сменяемости исторических эпох, идею эволюционирующей реальности, не пренебрегая при этом условием бесконечности существования во времени каждой исторической эпохи?

Очевидно, для этого надо использовать не классическую теорию, а квантовую, и тогда эволюционирующий Мир появляется как интерференция исторических эпох, как последовательность «горных пиков», в высоту каждого из которых вносит вклад каждая историческая эпоха, как квантовый волновой пакет исторических эпох в форме (13). Исторические эпохи *существуют одновременно*. Внешние наблюдатели находятся не вне этой суперпозиции, а внутри – внутри каждой исторической эпохи, для которых собственная историческая эпоха представляется истинной объективной реальностью. Находясь в эпохе Ω_{k_0} , наблюдатель X проводит наблюдение пакета (13),

который коллапсирует и пространственно органиченная часть состояния $\Omega_{k'}$ локализуется в эпохе Ω_{k_0} . Другими словами, картина коллапса (15) должна быть уточнена и заменена на следующую:

$$\int_K c_k \Psi_k [({}^3\mathcal{G})] d\mu(k) \xrightarrow[\text{измерение}]{X} \Psi_{k'} [({}^3\mathcal{G})] \subset \Omega_{k_0} \quad (16)$$

с вероятностью $|c_{k'}|^2$.

Считается, что при измерении интерференция между волновыми функциями (состояниями), входящими в волновой пакет, исчезает. Интерференция исчезает также в том случае, когда измерения совершается без регистрации определенного результата. Однако в случае системы Ω , которая является самой Реальностью, описанные измерения не разрушают полностью интерференцию, дающую пространство-время, а всего лишь приводят к потере интерференции между двумя эпохами $\Omega_{k_0}, \Omega_{k'}$, но не к полной потере интерференции всех прочих эпох.

Обозначим через $|k\rangle$ состояние исторической эпохи Ω_k с волновой функцией $\Psi_k [({}^3\mathcal{G})]$ квантовой системы Ω , описываемой суперпозицией

$$\sum_{k \in K} c_k |k\rangle.$$

Тогда измерение, производимое наблюдателем X с помощью аппарата \mathcal{A} с начальным состоянием A , нацеленное на специфическое значение 3-геометрии $({}^3\mathcal{G})'$ и присущее только исторической эпохе $\Omega_{k'}$, приводит к новой суперпозиции:

$$\sum_k c_k |k\rangle \otimes |A\rangle \rightarrow \left(\sum_{k, k \neq k_0, k'} c_k |k\rangle \right) \otimes |\tilde{A}\rangle + (c_{k_0} |k_0\rangle \otimes |A_0\rangle + c_{k'} |k'\rangle \otimes |A'\rangle). \quad (17)$$

Мы видим, что две эпохи $\Omega_{k_0}, \Omega_{k'}$ сцепливаются (переплетаются) с аппаратурой (окружением), а все прочие образуют интерференционную квантовую суперпозицию, намечающую классическую Вселенную, в которой отсутствует вклад эпох $\Omega_{k_0}, \Omega_{k'}$.

2. Квантовая механика и сознание. Квантовая механика нуждается в сознании, которое фигурирует в теории по именованию «наблюдателя». Наблюдатель, и только он, совершает измерение, т. е. вмешательство, воздействие на квантовую систему. Объективность науки требует, чтобы наблюдатель был не один – каждый физик, разбирающийся в квантовой механике – это потенциальный наблюдатель. В квантовой космологии наблюдатели находятся внутри системы. Следовательно, состояния Вселенной, именуемые нами историческими эпохами, все содержат наблюдателей (подобно тому, как состояния частицы – ее положения в пространстве, все привязаны к той или иной точке пространства). И так же как эти положения в пространстве у частицы все различны, так и наблюдатели в каждой исторической эпохе отличны по своим характеристикам, например, по хитроумности в экспериментах-измерениях. Другими словами, в разных эпохах наблюдатели различны по определенным наборам характеристик, отражающих их культурно-образовательно-мировоззренческий уровень, и, следовательно, эпохи Ω_k – это в действительности исторические эпохи в понимании историков (они населены людьми, наделенными характерными для конкретной эпохи культурно-образовательно-мировоззренческими взглядами). Поскольку нам дан волновой пакет исторических эпох, т. е. когерентная суперпозиция, то все эпохи существуют одновременно в квантовой реальности и складываются в интерференцию, обозначающую пространство-время и задающую физическое время.

Поскольку Вселенная существует как квантовая суперпозиция (13), описываемая уравнением Шрёдингера, а ее исторические эпохи при этом сцеплены друг с другом, то это дает возможность осуществлять взаимодействия между эпохами посредством измерений, производимых наблюдателями этих исторических эпох. Если бы квантовая суперпозиция подверглась, как предполагается

рядом исследователей, декогеренции, то она распалась бы на декогерентные истории, не сцепленные друг с другом (а только с окружением), т. е. представляющие собой принципиально невзаимодействующие исторические эпохи, или на параллельные миры в духе Эверетта.

Определенного рода деятельность (измерения) наблюдателей эпохи Ω_{k_0} относительно величин, типичных только для эпохи $\Omega_{k'}$, разрушит сцепленность последней с остальными эпохами, и сцепит ее с данной. Это измерение локализует частично каждую из двух эпох в другой. Возникнет переход из одной эпохи в другую. Это есть не что иное, как машина времени. Поскольку в другой эпохе есть мой квантовый двойник (это как другое местоположение одной частицы), то убить его не означает убить себя. Иначе говоря, парадокс дедушки решается тривиальным образом.

Благодаря наличию интерференционной картины – цепи «горных пиков» – существует классическое пространство-время, которое видится живущем в нем наблюдателям как «эволюционирующее», поскольку содержит вклады всех исторических эпох. Это видно в случае полуклассического приближении волнового пакета: если взять

$$\Psi_k[{}^{(3)}\mathcal{G}] = A_k[{}^{(3)}\mathcal{G}]e^{\frac{i}{\hbar}S_k({}^{(3)}\mathcal{G})},$$

то

$$\int_K c_k \Psi_k[{}^{(3)}\mathcal{G}]d\mu(k) = \left(\int_K c_k A_k[{}^{(3)}\mathcal{G}]d\mu(k) \right) e^{\frac{i}{\hbar}S_0}, \quad (18)$$

где

$$\forall k(S_k({}^{(3)}\mathcal{G}) = S_0 = const)$$

– условие интерференции. Из (18) видно, как цепи «горных пиков» складываются из разных интерферирующих эпох. Благодаря этому, втиснутые в единое пространство-время, наблюдатели рассуждают о наблюдаемых сменах исторических эпох, помнят своих предков, раскапывают исторические артефакты и прочее. При этом каждый из этих наблюдателей принадлежит конкретной исторической эпохе Ω_k , поскольку состояниями квантовой системы Ω являются эпохи, а не интерференция в форме пространства-времени (цепи «горных пиков»).

3. Негёделевская машина времени. Суперпозиция исторических эпох (13) дана нам в форме интерференции, которая являет собой классическое пространство-время M^4 и в котором мы существуем.

Геометрия ${}^{(3)}\mathcal{G}$ исторической эпохи Ω_k знает место своей *временной локализации* в 4-геометрии пространства-времени: «гиперповерхность, проведенная через пространство-время и состоящая из 3-геометрий, может сдвигаться во времени в любой из точек слишком незначительно, чтобы включить какую-либо новую 3-геометрию. Время, определенное таким образом, означает не более и не менее как локализацию 3-геометрии в 4-геометрии. В этом смысле 3-геометрия выступает как «носитель временной информации» [34, р. 37].

Пусть наблюдатель X в исторической эпохе Ω_{k_0} создает условия, которые осуществляют измерения геометрии (или иной величины), соответствующей другой эпохе $\Omega_{k'}$. Тогда происходит локализации части пространства эпохи $\Omega_{k'}$ в пространстве эпохи Ω_{k_0} наблюдателя X , благодаря тому, что возникает квантовая сцепленность (квантовая корреляция) двух эпох.

Другими словами, мы имеем коллапс пакета (13) в эпоху-реальность Ω_{k_0} , проявляющийся в локализации части пространства эпохи $\Omega_{k'}$ в реальности Ω_{k_0} . Открывается проход в иную эпоху.

Однако симметричным образом, поскольку эпоха $\Omega_{k'}$ – это такая же объективная реальность, каковой является эпоха Ω_{k_0} , а также в силу того, что измерение производимое наблюдателем эпохи Ω_{k_0} по сути дела двусторонне, т.е. является *взаимодействием* (благодаря их квантовой сцепленности), происходит локализация части пространства эпохи Ω_{k_0} в эпохе-реальности $\Omega_{k'}$. Грубо говоря, наблюдатель X оказывается в другой исторической эпохе вместе со своей аппаратурой. Мы имеем то, что называется машиной времени. Будем называть ее *негёделевской*, поскольку не идет речь о замкнутых временных петлях, придуманных Гёделем.

Закрывается ли проход из одной исторической эпохи в другую? Да, закрывается. Для этого наблюдателю X не нужно даже выключать свою аппаратуру, поскольку согласно эффекту Зенона, непрерывное измерение может привести к тому, что динамика становится тривиальной, по существу, к приведет исчезновению динамики. Да и сам процесс локализации макрообъектов крайне скоротечен. Другой вопрос, как его открыть, как конкретно работает негёделевская машина времени?

Обратим внимание, что переходы носят вероятностный характер. Другими словами, оказаться в нужной исторической эпохе можно далеко не всегда. Переход более или менее надежно произойдет лишь в том случае, когда число $|c_{k'}|^2$ близко к 1.

Поскольку переход совершается только с вероятностью $|c_{k'}|^2$, то в случае малости величины этой вероятности по закону больших чисел он не происходит. Иначе говоря, путешествия во времени крайне редки, и в силу этого, мы не наблюдаем путешественников во времени в нашей эпохе.

Как оценить число $|c_{k'}|^2$? Каждая историческая эпоха – это доминирующая культура, доминирующий суперэтнос. Сколько таких суперэтнотов известно в человеческой истории? Древний Китай, Древняя Индия, якуты в XVII веке, племена папуасов на острове Новая Гвинея, описанные Миклухо-Маклаем, – примеры таких культур, таких исторических эпох. Их явно не менее тысячи, поэтому при равномерном распределении исторических эпох $|c_{k'}|^2 \sim 10^{-3}$. Мы имеем явно маловероятные события, говорящие о том, что переходы во времени невозможны. Но вполне возможно, что существуют наиболее вероятные эпохи. Они-то и могут быть местами повально-го туризма путешественников во времени. Но в таких эпохах к ним относятся, как к недавнему навалу русских в Турцию. Наша же эпоха явно не Анталия. Хотя, и такие поездки рискованны: кому захочется отправиться в путешествие, конечное место назначения которого точно указать невозможно. Например, вместо того, чтобы комфортно наблюдать Пушкина в Летнем саду можно оказаться в «Парке юрского периода».

4. Декогеренция. Когерентная суперпозиция (13) способна давать интерференцию. Квантовая суперпозиция – это мера «квантовости» системы. Каждая цепь «горных пиков» – это отдельное альтернативное пространство-время, альтернативная история, являющаяся решением квантового уравнения Шрёдингера (14).

В современной космологии считается, что альтернативные истории (ветви) становятся в раннем возрасте Вселенной декогерентными, т.е. невзаимодействующими классическими историями в силу процесса декогеренции. Декогеренция уничтожает интерференцию. По мнению Зеха [38] и Йоса [39] в случае Вселенной декогеренция происходит за счет воздействия на ветвь *её окружения*, которое описывается набором незначимых переменных. Их роль играют флуктуации плотности, гравитационные волны и другие поля. При этом воздействии *незначимые переменные* сцепляются со *значимыми переменными* (радиус Вселенной, инфляционное скалярное поле). В результате у ветвей проявляются классические черты – *они локализуются* и квантовая связь между ними исчезает.

Декогеренция волнового пакета (13) разрушает когеренцию, и в результате имеем набор классических исторических эпох, которые не имеют между собой ни энергетической, ни квантовой (нелокальной) связей. Очевидно, что в таком случае негёделевская машина времени становится невозможной. В [40] для того, чтобы перейти из одной (классической) исторической эпохи в другую, или вернуться в прошлое, предлагается другой механизм, основанный на обращении времени, и связанный с необходимостью произвести восстановление нелокальных связей. Такой проект машины времени кажется нам совершенно не обладающим.

Теория декогеренции, столь популярная в последние годы, в случае ее применения к космологии, больше похожа на магические заклинания, чем на тщательные расчеты, о чем в корректной форме говорится в [41]. Поэтому естественная декогеренция, сцепляющая (переплетающая) существенные и несущественные переменные, вряд ли возможна в действительности. Следовательно,

не стоит говорить о том, что Вселенная распадается на декогерентные истории на ранней фазе развития Вселенной и тем самым можно думать о реальности временных переходов между историческими эпохами.

Заключение

Представленные в данном обзоре проекты квантовых машин времени продемонстрировали обнадеживающую возможность решения временных парадоксов. Главным образом, это D-СТС и P-СТС машины времени. Однако пока в соответствующих работах речь идет всего лишь о *моделировании ситуаций* с тем или иным парадоксом, и всего лишь о посылке в *условное* [19], или эффективное прошлое по Светличному, элементарных частиц. Вопрос, годится ли квантовая телепортация для посылки человека в прошлое? В случае проекта не-Гёделевской машины времени число нерешенных проблем еще больше. Многие из них носят характер несовместимых с действующей научной парадигмой о строении физической Реальности. Впрочем, это можно сказать и о машине времени Светличного-Ллойда.

Во всяком случае, как пишет Светличный, «у нас есть источник повествования о путешествиях во времени, в которых разрешены все парадоксы, и это имеет интересные философские и научные последствия» [18, р. 5].

Благодарность. Автор благодарит С.М. Коротаева за ценные разъяснения по функционированию P-СТС машины времени.

Список литературы

1. Гуц А.К. О времениподобных замкнутых гладких кривых в общей теории относительности // Известия вузов. Физика. 1973. № 9. С. 33–36.
2. Константинов М.Ю. О кинематических свойствах топологически нетривиальных моделей пространства-времени // Известия вузов. Физика. 1992. № 12. С. 83–88.
3. Гуц А.К. Реальность и машина времени // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2013. № 3. С. 29–48.
4. Гуц А.К. Хроногеометрия: Аксиоматическая теория относительности / Изд. 2, испр. и доп. М.: УРСС, 2018. 352 с.
5. Гуц А.К. Время. Машина времени. Параллельные вселенные. М.: УРСС, 2019. 376 с.
6. Александров А.Д. Замечание о правилах коммутации и уравнении Шредингера // Доклады АН СССР. 1934. Т. 4. № 4. С. 198–202.
7. Aharonov Y., Anandan J., Popescu S., Vaidman L. Superposition of Time Evolutions of Quantum System and a Quantum Time Translation Machine. *Physical Review Letters*. 1990; vol. 64. P. 2965.
8. Vaidman L. A Quantum Time Machine. *Foundations of Physics*. 1991; vol. 21. no. 8. P. 947–958.
9. Deutsch D. Quantum mechanics near closed timelike lines. *Phys. Rev.* 1991; D 44, no. 10. P. 3197–3218 .
10. Verch R. The D-CTC Condition in Quantum Field Theory. <https://arXiv:1904.02747v1>.
11. Deutsch D. Quantum computational networks. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1989; vol. 425, Iss. 1868. P. 73–90.
12. Korotaev S.M., Kiktenko E.O. Quantum causality in closed timelike curves. *Phys. Scripta*, 2015; vol. 90. P. 085101–085115.
13. Friedman J., Morris M.S., Novikov I.D., Echeverria F., Klinkhammer G., Thorne K.S., Yurtsever U. *Phys. Rev.* D 42. P. 1915.
14. Александров А.Д. О основах теории относительности // Вестник ЛГУ, сер. мат. 1976. №. 19. С. 5–28.
15. Aharonov Y., Bergmann P., Lebowitz J. Time Symmetry in the Quantum Process of Measurement. *Phys. Rev. B*. 1964; vol. 134. P. 1410–1416.
16. Bennett C.H., Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing // Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing, Bangalore, 10-12 December 1984, P. 175–179.

17. Bennett C. Talk at QUPON, Wien. <http://www.research.ibm.com/people/b/bennetc/>.
18. Svetlichny G. Effective Quantum Time Travel. <https://arxiv.org/pdf/0902.4898.pdf>.
19. Киктенко Е.О., Коротаев С.М. Причинность в квантовой телепортации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2014. № 6. С. 24–36.
20. Lloyd S., Maccone L., Garcia-Patron R., Giovannetti V., Shikano Y. The quantum mechanics of time travel through post-selected teleportation. <https://arxiv.org/abs/1007.2615v2>.
21. Lloyd S., Maccone L., Garcia-Patron R., Giovannetti V., Shikano Y., Pirandola S., Rozema L.A., Darabi A., Soudagar Y., Shalm L.K., Steinberg A.M. Closed timelike curves via post-selection: theory and experimental demonstration. *Physical Review Letters*. 2011; vol. 106, no. 4. P. 040403. <https://arxiv.org/abs/1005.2219v1>.
22. 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.
23. Киктенко Е.О., Коротаев С.М. Квантовая причинность на замкнутых времениподобных траекториях // Необратимые процессы в природе и технике. Труды восьмой Всероссийской конференции. 2015. С. 217–221.
24. Juan Yin, Yuan Cao and others. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. *Science*. 2017; vol. 356. Iss. 6343. P. 1140–1144.
25. Ghosh S., Adhikary A., Goutam P. Quantum Signaling to the Past Using P-CTCS. <https://arxiv.org/pdf/1708.03521.pdf>.
26. Ralph T. Problems with modelling closed timelike curves as post-selected teleportation. :arXiv:1107.4675.
27. Квашнин Д. Модель машины времени показала отсутствие парадоксов. <https://24hitech.ru/model-mashiny-vremeni-pokazala-otsutstvie-paradoksov.html>
28. Mochon C. Introduction to Quantum Teleportation. <http://lightlike.com/teleport/teletalk.pdf>
29. Gray A. A Design for a Quantum Time Machine. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/9804008v1>.
30. Gray A. A Design for a Quantum Time Machine. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/9804008v2>.
31. Gray A. A Solution to the Quantum Measurement Problem. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/9712037v1>.
32. Гуц А.К. Временные эффекты коллапса волнового пакета в суперпространстве Уилера // Международный научный семинар «Нелинейные модели в механике, статистике, теории поля и космологии» GRACOS-16. Лекции школы и материалы семинара (5 - 7 ноября 2016 г., Казань). Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2016. С. 273–280.
33. Guts A.K. Geometry of historical epoch, the Alexandrov's problem and non-Gödel quantum time machine. <http://arxiv.org/abs/1608.08532v1>.
34. Уилер Дж. Предвидение Эйнштейна. М.: Мир, 1970.
35. Halliwell J.J. Introductory lectures on quantum cosmology // In: Quantum cosmology and baby universes / Eds. Coleman S., Hartle J.B., Piian T., Weinberg S. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1991. P. 159–244.
36. Kiefer C. *Quantum Gravity, Second Edition*. Oxford University Press, 2007. 361 p.
37. Гуц А.К. Многовариантная Вселенная и теория исторических последовательностей // Математические структуры и моделирование. 2012. № 25. С. 70–80.
38. Zeh H.D. Emergence of classical time from a universal wave function *Physics Letters*. 1986. A 116. P. 9–12.
39. Joos E.A. Why do we observe a classical spacetime? *Phys. Lett.* 1986. A 116. P. 6–8.
40. Доронин С.И. Квантовая магия. Санкт-Петербург: Весь, 2007. 336 с.
41. Okon E., Sudarsky D. Less Decoherence and More Coherence in Quantum Gravity, Inflationary Cosmology and Elsewhere. <http://arxiv.org/abs/1512.05298v1>.

References

1. Guts A.K. On timelike closed smooth curves in general relativity, *Izvestiya visshih uchebnih zavedeniy, Fizika*, 1973, no. 9, pp. 33–36.
2. Konstantinov M.Yu. On kinematical properties of topologically non-trivial spacetime models, *Izvestiya visshih uchebnih zavedeniy, Fizika*, 1992, no. 12, pp. 83–88.

3. Guts A.K. Reality and time machine, *Prostranstvo, vremya i fundamentalnie vzaimodeystviya*, 2013, no. 3, pp. 29–48.
4. Guts A.K. *Chronogeometriya. Aksiomaticheskaya teoriya odnositel'nosti* (Chronogeometry. Axiomatic theory of relativity), Moscow: URSS, 2018, 352 p.
5. Guts A.K. *Vremya. Mashina vremeni. Parallelnie vseennie* (Time. Time machine. Parallel universes), Moscow: URSS, 2019. 376 p.
6. Alexandrov A.D. Remark on commutation rules and Schrödinger equation, *Doklady akademii nauk SSSR*, 1934, T. 4, no. 4. pp. 198–202.
7. Aharonov Y., Anandan J., Popescu S., Vaidman L. Superposition of Time Evolutions of Quantum System and a Quantum Time Translation Machine, *Physical Review Letters*, 1990, V. 64, p. 2965.
8. Vaidman L. A Quantum Time Machine, *Foundations of Physics*, 1991, V. 21, no. 8, pp. 947–958.
9. Deutsch D. Quantum mechanics near closed timelike lines, *Phys. Rev.* 1991, D 44, no. 10, pp. 3197–3218 .
10. Verch R. The D-CTC Condition in Quantum Field Theory. <https://arxiv.org/abs/1904.02747v1>.
11. Deutsch D. Quantum computational networks, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1989, V. 425, Iss. 1868, pp. 73–90.
12. Korotaev S.M., Kiktenko E.O. Quantum causality in closed timelike curves // *Phys. Scripta*, 2015. Vol. 90. P. 085101–085115.
13. Friedman J., Morris M.S, Novikov I.D., Echeverria F., Klinkhammer G., Thorne K.S., Yurtsever U., *Phys. Rev.*, D 42, p. 1915.
14. Alexandrov A.D. On foundation of relativity theory, *Vrstnik Leningrad. gos. universiteta, ser. mat.*, 1976. no. 19, pp. 5–28.
15. Aharonov Y., Bergmann P., Lebowitz J. Time Symmetry in the Quantum Process of Measurement, *Phys. Rev. B*, 1964, Vol. 134, pp. 1410–1416.
16. Bennett C.H., Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing*, Bangalore, 10-12 December 1984, pp. 175–179.
17. Bennett C. Talk at QUPON, Wien. <http://www.research.ibm.com/people/b/bennetc/>.
18. Svetlichny G. Effective Quantum Time Travel. <https://arxiv.org/pdf/0902.4898.pdf>.
19. Kiktenko E.O., Korotaev S.M. Causality in quantum teleportation, *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman, Ser. Estestvennye nauki*, 2014, no. 6, pp. 24–36.
20. Lloyd S., Maccone L., Garcia-Patron R., Giovannetti V., Shikano Y. The quantum mechanics of time travel through post-selected teleportation. <https://arxiv.org/abs/1007.2615v2>.
21. Lloyd S., Maccone L., Garcia-Patron R., Giovannetti V., Shikano Y., Pirandola S., Rozema L.A., Darabi A., Soudagar Y., Shalm L.K., Steinberg A.M. Closed timelike curves via post-selection: theory and experimental demonstration. // *Physical Review Letters*. 2011. Vol. 106, No. 4. P. 040403. <https://arxiv.org/abs/1005.2219v1>.
22. Laforest M., Baugh J., Laflamme R. Time-reversal formalism applied to maximal bipartite entanglement: Theoretical and experimental exploration, *Phys. Rev. A*. 2006, V. 73, p. 032323.
23. Kiktenko E.O., Korotaev S.M. Quantum causality on closed timelike trajectories, *Neobratimie processi v prirode i trhnike, Trudi 8 vserossiyskoy konferencii*, 2015, pp. 217–221.
24. Juan Yin, Yuan Cao and others. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers, *Science*, 2017, V. 356, Iss. 6343, pp. 1140–1144.
25. Ralph T. Problems with modelling closed timelike curves as post-selected teleportation. :[arXiv:1107.4675](https://arxiv.org/abs/1107.4675).
26. Ghosh S., Adhikary A., Goutam P. Quantum Signaling to the Past Using P-CTCS. <https://arxiv.org/pdf/1708.03521.pdf>.
27. Kashnin D. Model of time machine sows absent of paradox. <https://24hitech.ru/model-mashiny-vremeni-pokazala-otsutstvie-paradoksov.html>
28. Gray A. A Design for a Quantum Time Machine. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/9804008v1>.
29. Gray A. A Design for a Quantum Time Machine. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/9804008v2>.
30. Gray A. A Solution to the Quantum Measurement Problem. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/9712037v1>.

31. Guts A.K. Temporal eddects of wave packets collapse in Wheeler superspace, Mezhdunarodniy nauchniy seminar Nelineynie modeli v mehanikem statike, terii polya i kosmologii, GRACOS-16, Kazan', 2016, pp. 273–280.
32. Guts A.K. Geometry of historical epoch, the Alexandrov's problem and non-Gödel quantum time machine. <http://arxiv.org/abs/1608.08532v1>.
33. Wheller J.A. Einstein View. Moscow, Mir pybl., 1970.
34. Halliwell J.J. Introductory lectures on quantum cosmology // In: Quantum cosmology and baby universes / Eds. Coleman S., Hartle J.B., Piian T., Weinberg S. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1991. P. 159–244.
35. Kiefer C. Quantum Gravity. Second Edition. Oxford University Press, 2007. 361 p.
36. Guts A.K. Manyvariant universe and theory of historic sequences, Matematicheskie strukturi i modelirovanie, 2012, no. 25, pp. 70–80.
37. Zeh H.D. Emergence of classical time from a universal wave function // Physics Letters. 1986. **A 116**. P. 9–12.
38. E.A. Joos, Why do we observe a classical spacetime? // Phys. Lett. 1986. A116. P. 6–8.
39. Doronin S.I. *Kvantovaya magiya* (Quantum magic), Sankt-Peterburg, Ves', 2007, 336 p.
40. Okon E., Sudarsky D. Less Decoherence and More Coherence in Quantum Gravity, Inflationary Cosmology and Elsewhere. <http://arxiv.org/abs/1512.05298v1>.

Авторы

Гуц Александр Константинович, д. ф.-м. н., профессор, кафедра кибернетики, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, пр. Мира, 55а, г. Омск, 644077, Россия.

E-mail: aguts@omsu.ru

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гуц А. К. Квантовая машина времени // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2019. № 3. С. 20–44.

Authors

Guts Alexander Konstantinovich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dostoevsky Omsk State University, Mira str., 55-a, Omsk, 644077, Russia.

E-mail: aguts@omsu.ru

Please cite this article in English as:

Guts A.K. The quantum time machine. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2019, no. 3, pp. 20–44.