

Глава 2.4. Мгновенная передача информации на расстояние. Квантовая телепортация вещества.

Целесообразность изучить возможность этого явления кроме вероятных его технических приложений, обусловлена его фундаментальной важностью. Это необходимо не только для формирования физической картины мира в контексте представлений о пространстве и времени, но и для определения физики, как самодостаточной фундаментальной науки о неживой природе.

Источником столь критического состояния дел стала невозможность совместить эмпирический факт одновременного изменения волновой функции квантовой частицы одновременно во всём пространстве с положениями СТО и, в конечном счёте, с фундаментальным принципом причинности. Если по отношению к шрёдингеровской эволюции этот факт «замазывается» её унитарностью, то по отношению к процессу редукции волновой функции при измерении это противоречие становится явным. Последнее обстоятельство не только отражено в соответствующем постулате, но и выражается в фактическом отсутствии его интерпретации с точки зрения физики¹, как естественной науки.

Выше было показано, что все проблемы надуманы и решаются заменой представления о массовой частице, как о материальной точке, представлением о ней, как о цельном распределённом в пространстве объекте — сплошной среде, являющейся совокупностью материальных полей. Строго говоря, и то и другое представление являются гипотезами и требуют, подтвердить одно из альтернативных предположений экспериментально. Фактически это уже сделано многократно. Кратко опишем историю этой вопроса.

Начнём с упомянутого выше ЭПР парадокса, показавшего наличие проблемы противоречия позиции локального реализма некоторым положениям квантовой механики. В качестве исходного пункта авторы, по сути, утверждают, что корреляция результатов измерений, производимых над частицами, находящимися в запутанном состоянии и разделённых пространственноподобным интервалом должны быть (с точки зрения позиции локального реализма) следствием наличия неких скрытых параметров, *a priori* характеризующих эти частицы и являющимися теоретическими образами их реальных физических свойств. Другими словами, исходя из предположения локальности в смысле независимости пространственно удалённых измерений и факта наличия корреляций между их результатами (что отражено в квантовой теории), следует либо наличие скрытых параметров, либо причинно-следственной связи между пространственноподобными событиями, что противоречит СТО². ЭПР исключают последнее и приходят к выводу о неполноте квантовой механики. Однако проблема ещё глубже: в некоторых физических ситуациях квантовомеханические расчёты корреляций результатов удалённых измерений прямо противоречат аналогичным расчётам, выполненным в соответствии с *любой(!!!)* теории скрытого параметра. Это означает, что выводы СТО (при ЭПР понимании локальности) противоречат положениям квантовой механики. Решить, какая из указанных теорий права дала возможность схема Джона Белла, которая позволила придать различие в некоторых физических ситуациях³ предсказаниям теорий скрытого параметра и квантовой механики количественные характеристики, которые могут быть определены экспериментально. Не вдаваясь в подробности выводов неравенств Белла (этот вопрос очень просто и кратко изложен, например, в докладе [А.Аспе](#)), отметим, что с их помощью экспериментально была подтверждена правота квантовой динамики и, следовательно, наличие издержек СТО. Несмотря на кажущуюся «дикость» такого вывода, формальная логика требует сделать это. Вопрос лишь в том, насколько издержки СТО серьёзны. Очевидно, что они не должны затрагивать основные положения и выводы этой теории. Первый же взгляд на её основы показывает, что определение понятия события, относятся к событиям с материальными точками, то есть элементами, локализованными в пространстве, тогда как квантовая механика имеет дело с совокупностями материальных полей — распределёнными в пространстве объектами. Это различие особенно явно проявляется в случаях «больших» по размеру волновых функций (как в случае ЭПР парадокса). В этих случаях непонятно, как определить понятие интервала между событиями. Именно такое положение дел позволяет полностью устранить все противоречия с принципом причинности и сохранить неизменными, в рамках своих постулатов (но не интерпретации⁴), обе великие теории. Локальность понимается при этом как отсутствие действия на расстоянии. Пронизывающие друг друга материальные поля квантовых частиц обеспечивают это близкодействие, тогда как удалённые классические приборы непосредственно не взаимодействуют между собой. Но тогда влияние одного локального события (появление результатов из-

¹Введение разума (понятия, не имеющего точного определения даже в философии) в структуру квантовой теории не менее, чем отказ от физики, как естественнонаучной дисциплины. Что касается совершенно «дикой» многомировой интерпретации Эверетта, то она не имеет никаких последствий для физических явлений, следовательно, принципиально не может быть проверена.

²Действительно, для пространственноподобных событий существуют инерциальные системы отсчёта, для которых эти события происходят в различной временной последовательности, что по определению исключает их причинно-следственную связь.

³Белл строго логически сформулировал общие неравенства, которые должны выполняться для любой локальной теории скрытого параметра, и оказалось, что в некоторых физических ситуациях, эти неравенства несовместимы с квантовой механикой.

⁴Интерпретация волновой функции, как и всей квантовой механики, при этом становится реалистической.

мерения на одном из приборов) мгновенно влияет на событие (результат измерения второго прибора). Это можно рассматривать как экспериментальный факт⁵. Существования пространственно распределённых событий снимает принципиальные, с позиции СТО, ограничения на возможность передачи информации на расстояние быстрее скорости света

Действительно, информацию между квартирами на различных этажах можно передать посылкой «гонца» бежать по лестнице, а можно перестукиваясь по батарее (пространственно распределённый объект). При этом конечная скорость звука обусловлена наличием пустого пространства между частицами батареи, вследствие чего, для воздействия на соседние частицы необходимо их перемещение в этом пространстве. В случае всюду плотного в пространстве вещества скорость передачи воздействия будет бесконечной. Наглядным примером может служить скорость передачи импульса от локомотива толкающего первый вагон состава последнему вагону. Эта скорость тем выше, чем меньше расстояние между вагонами и в пределе, если положить бесконечной скорость звука в вагонах, становится бесконечной. В нашем случае, материальные поля, по определению, плотно заполняют всё пространство, поэтому возможна мгновенная передача внешнего воздействия на квантовую частицу в одной области пространства в любую точку сплошной среды этой частицы⁶.

Вопрос возможности передачи информации со скоростью быстрее скорости света (Faster than light communication, superlumine communication) и вопрос соответствующего взаимодействия не тождественны. Например, мгновенная передача воздействия с использованием процесса редукции волновой функции описана выше, тогда как передача информации таким образом, невозможна. Причиной этого является вероятностный характер измерения. Действительно, проводя измерение той или иной характеристики одной из частиц, находящейся в запутанном состоянии, мы не можем сказать, было ли произведено измерение характеристик удалённой частицы. Даже совокупность измерений, произведённых над идентичными частицами в идентичных состояниях, не порождает ансамбль удалённых частиц в состояниях, позволяющих установить без дополнительной информации факт измерений характеристик удалённой частицы. Приведём здесь смысл краткого доказательства этого положения приведённого в работе Н. Гизина «Stochastic Quantum Dynamics and relativity».

Пусть имеется совокупность идентичных квантовых систем, каждая из которых описывается запутанной волновой функциями типа предложенной ЭПР. Пусть производятся измерения характеристик второй частицы. После этого измерения, состояние первой частицы описывается матрицей плотности $\varrho(0) = \sum_i p_i |\varphi_i\rangle\langle\varphi_i|$, где φ_i собственные функции какого-либо оператора (в нашем случае операторов импульса или координаты первой частицы); p_i — вероятность данного состояния в ансамбле. Индекс i в этом разложении соответствует результату измерения, произведённого над второй частицей. Таким образом, производя измерения координаты или импульса второй частицы, мы имеем различные разложения одного и того же оператора матрицы плотности, описывающего состояние первой частицы. Статистические ансамбли состояний первой частицы, соответствующие различным разложениям, эквивалентны по отношению к любым измерениям. Тогда, чтобы иметь возможность различить между собой ансамбли и, тем самым, узнать тип измерения, производимого над второй частицей (что означает возможность мгновенной передачи информации на расстоянии), необходимо существование нелинейной и детерминированной эволюции матрицы плотности. Эволюция Шредингера линейна. Нелинейные слагаемые описывающие эволюцию матрицы плотности при редукции сокращаются. Действительно, при редукции волновая функция системы преобразуется следующим образом:

$$\Psi \rightarrow \begin{cases} \frac{P|\Psi\rangle}{\|P|\Psi\rangle\|} & \text{с вероятностью } \langle P \rangle, \\ \frac{(1-P)|\Psi\rangle}{\|(1-P)|\Psi\rangle\|} & \text{с вероятностью } \langle 1-P \rangle, \end{cases}$$

где P — оператор проектирования. Тогда матрица плотности в результате редукции приобретает вид:

$$\varrho(t) = \sum_i p_i \langle P \rangle_{\varphi_i} \frac{P|\varphi_i\rangle\langle\varphi_i|P^\dagger}{\|P|\varphi_i\rangle\|^2} + \sum_i p_i \langle 1-P \rangle_{\varphi_i} \frac{(1-P)|\varphi_i\rangle\langle\varphi_i|(1-P)^\dagger}{\|(1-P)|\varphi_i\rangle\|^2} = P\varrho_0P + (1-P)\varrho_0(1-P).$$

Таким образом, вид матрицы плотности после процесса редукции не зависит от конкретного ее разложения по собственным состояниям наблюдаемой, что сохраняет эквивалентность статистических ансамблей. Именно случайный характер результатов коллапса волновой функции не позволяет рассчитывать на мгновенную передачу информации на макроскопическом уровне. Это обстоятельство, однако не является универсальным препятствием, таким как принцип причинности. Его можно преодолеть если избавиться от случайного характера нелинейной эволюции, имеющим место при квантовом измерении.

⁵Каким образом при этом сохраняется принцип причинности для различных инерциальных систем отсчёта—отдельный и очень интересный вопрос в рамках СТО, а именно её обобщения на распределённые в пространстве события.

⁶Отметим, что взаимодействие между индивидуальными точками материальных полей квантовых частиц не носит силового характера, а определяется корреляциями плотностей их меры и фазы.

Как показано в главе 2.2 сайта, необходимая для передачи информации нелинейная эволюция состояния квантовой системы, имеет место для открытых квантовых систем, причём это детерминистическая эволюция. Таким образом, снимается запрет на передачу информации, обусловленный случайным характером результата наблюдений за удалённым объектом. Тогда, локальное селективное воздействие на материальные поля квантовой частицы, немедленно приведёт к соответствующему изменению её состояния во всём пространстве, причём в отличие от редукции это изменение строго детерминировано (см. систему динамических уравнений главы 2.2) и, полученные в результате такого воздействия ансамбли состояний квантовых частиц, различимы по отношению к исходному внешнему воздействию. В результате оказывается возможной мгновенная передача информации между удалёнными точками пространства, плотно заполненного материальными полями квантовых частиц. Более того, такая передача уже фактически реализована.

1. *Мгновенная передача информации на макроскопическое расстояние в экспериментах с использованием целочисленного эффекта Холла.* Передача информации на расстояние быстрее скорости света была реализована [С.А.Емельяновым](#) в экспериментах с использованием макроскопических состояний типа Лафлина-Гальперина, возникающих при квантовом эффекте Холла. Особую важность эти экспериментам придаёт не столько тот факт, что информация была передана быстрее скорости света на макроскопическое (1 см.) расстояние, а то, что на это же расстояние был телепортирован макроскопический ансамбль электронов. Последнее обстоятельство принципиально отличает обнаруженное явление от хорошо известной квантовой телепортации состояния. В эксперименте электроны макроскопического ансамбля локальной области кристалла оптически переходили в макроскопические квантовые состояния, которые затем релаксировали в локальные состояния в области, где волновая функция состояния Лафлина-Гальперина отлична от нуля. В результате этого в соответствующих областях возникала проводимость, которая регистрировалась в виде макроскопического тока между контактами, к которым прикладывалось напряжение. В эксперименте электрон из локального состояния оптически переводится в состояние макроскопического размера. Скорость этого процесса характеризуется скоростью поглощения энергии кванта излучения. Это возбуждённое состояние дезактивируется в результате взаимодействия с кристаллом во всём объёме, где его волновая функция отлична от нуля, причём скорость дезактивации для однородного кристалла той или иной точке пространства определяется только значением макроскопической волновой функции и не зависит от волновой функции исходного локализованного состояния. В результате, время необходимое для передачи вещества электрона из одной точки пространства в другую, равно сумме времён возбуждения макроскопического состояния и его дезактивации, и не зависит от пространственного размера макроскопического состояния. Тогда, в силу отсутствия каких-либо принципиальных ограничений на размер одночастичных состояний, это время может оказаться меньше времени необходимого для перемещения электрона «обычным» механическим образом. Универсальным ограничением, в последнем случае, является время прохождения светом этого расстояния. В описываемых экспериментах это время составляло $3,3 \cdot 10^{-11} \text{ с}$ что приблизительно на два порядка превышало время телепортации электрона по квантовому каналу. Условия эксперимента исключали возможность получить представленные результаты за счёт перемещения электронов «обычным образом» (см. указанную выше работу), в связи с чем можно утверждать, что передача информации на макроскопическое расстояние быстрее скорости света была реализована за счёт перемещения её макроскопического носителя, причём не в результате механического движения, предполагающего наличие непрерывного множества промежуточных положений вещества в пространстве. В свою очередь, время перемещения электронов по квантовому каналу (то есть телепортации) в условиях эксперимента было много меньше времени, необходимому свету, чтобы пройти соответствующее состояние. Таким образом, скорость передачи информации, также как и скорость перемещения её носителя существенно превышала скорость света. К сожалению, точность измерения времени не позволяла установить этот факт непосредственно, но неприятие его на этом основании, означает отказ от фундаментальных основ традиционной квантовой механики, а частности от представления состояния квантовой частицы вектором в гильбертовом пространстве.

2. *Мгновенная передача информации в конфигурационном пространстве ансамбля электронов при туннельном эффекте.* Одновременное изменение волновой функции во всём физическом пространстве порождает ещё одно противоречие с СТО, носящий название [эффекта Хартмана](#). Суть проблемы на которую впервые указал [Л. Макколл](#) ещё в 1932 г. состоит в следующем: поскольку при туннельном эффекте волновая функция под барьером представляет собой вещественную экспоненту, её значения на противоположной стороне барьера изменяется одновременно (не возникает временной задержки, обусловленной комплексностью пространственной волновой функции) и как следствие этого, можно сформировать волновой пакет, падающий на барьер, то «на выходе из барьера» соответствующий пакет будет возникать одновременно с «исчезновением» падающего пакета. Другими словами квантовая частица, представляемая, волновым пакетом не затрачивает время на прохождение пространства под барьером. Это означает, что если верить квантовой механике, частица под барьером либо движется с бесконечной скоростью (что противоречит СТО), либо телепортируется через него. Таким образом, также как и ЭПР парадокс ставит вопрос о состоятельности квантовой механики, но уже с позиции не локальности взаимодействия,

а локальности перемещения, то есть возможности телепортации. Ничтожно малое время необходимое свету, чтобы преодолеть фактические расстояния под барьером, доступные изучению до недавнего времени не позволяли разрешить этот парадокс. Однако, проведённые в 2018-2019 гг. экспериментальные исследования, основанные на уникальной возможности временного разрешения в [аттосекундном диапазоне](#) сообщают, что время ионизации атома водорода в процессе туннелирования близко к нулю. При этом даже неопределённость в определении времени туннелирования не устраняет указанную альтернативу поскольку [верхняя граница](#) экспериментально определённого времени туннелирования, которая меньше значения любого времени, которое теоретически может рассматриваться как время туннелирования частицы. Таким образом, было прямо показано, что существует квантовый механизм телепортации макроскопического ансамбля электронов на конечное (правда микроскопическое) расстояние.

Оба упомянутых эксперимента в принципе могут быть описаны с помощью представленной в главе 2.2 системы динамических уравнений только на качественном уровне. Для количественного описания первого из них необходимо разработать на основе рассмотренной динамики статистическое описание электронов в твёрдом теле. Что касается экспериментов по туннелированию, то в этом случае следует адаптировать динамическую систему уравнений главы 2.2 к ситуации взаимодействия атома с лазерным лучом, что представляет собой неоправданно сложную задачу.

Существование мгновенной телепортации вещества противоречит СТО только в том случае, если в природе существуют распределённые в пространстве материальные объекты, которые могут быть представлены в виде материальных точек только в качестве математической абстракции, применимой лишь в определённых условиях. Пространство локализованных событий, как основа всех выводов СТО, не является универсальным. Более того, само понятие пространства, как некоторой «сцены», на которой происходят события с материальными объектами, должно претерпеть изменения. Здесь возникает ситуация когда, также как и в ОТО, физический вакуум начинает обладать физическими свойствами и возникает необходимость использовать эйнштейновское понятие [релятивистского эфира](#).

Разумеется, все мы в различной степени обладаем скептицизмом апостола Фомы и необходимость столь радикальных изменений в физической картине мира, вызывает у нас желание «...вложить перст в раны...», чтобы дополнительно удостовериться в необходимости очевидного. Для этого хотелось бы сделать такие эксперименты в которых сигнал переданный на макроскопическое расстояние явно опережал (лучше всего непосредственно на экране осциллографа) реперный луч света. То же самое относится и к телепортации. На первый взгляд представляется более простым реализовать это для передачи макроскопически различного квантового состояния без переноса материи, поскольку в этом случае можно использовать составную систему, содержащую в себе когерентное электромагнитное излучение, что упрощает задачу увеличения пространственного размера волновой функции.