

УДК 530.1, 53.02

А. В. Белинский,<sup>1</sup> М. Х. Шульман<sup>2</sup>**КВАНТОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ И СВЕРХСВЕТОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ**

Статья посвящена попытке разрешения конфликта между теорией относительности и квантовой механикой. Согласно нашей гипотезе, мгновенная коррелированность ЭПР-частиц объясняется существованием колебаний, скорость распространения которых может превышать скорость света в вакууме. При этом не происходит необратимой передачи энергии и информации между ЭПР-частицами, поэтому соблюдается релятивистская причинность.

**Ключевые слова:** теория относительности, квантовая механика, корреляция, парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена, сверхсветовая скорость, релятивистская причинность, горизонт событий, матрица плотности, система координат, метрика Шварцшильда, метрика Леметра, горизонт Риндлера, запутанное состояние.

**PACS:** 03.65.Ud**Введение**

В настоящее время распространено убеждение, что теория относительности запрещает скорость физического взаимодействия, превышающую скорость света в вакууме. Поскольку из квантовой механики (КМ) следует возможность практически "мгновенной" корреляции на сколь угодно больших расстояниях (парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена), и это многократно подтверждено экспериментами (см. например, [1, 2]), то КМ оказывается в непреодолимом конфликте с теорией относительности (ТО). Как отметил в 1990 году Дж. Белл в своем докладе [3]:

*Мы имеем дело со статистическими предсказаниями квантовой механики, и они кажутся верными. Эти корреляции прямо-таки вопиют об объяснении, а мы не можем его дать.*

Далее Белл высказывает надежду:

*<... > здесь, как мне кажется, мы имеем временное затруднение. Ему, правда, шестьдесят лет, но в масштабах длительности существования человечества это очень небольшое время. Я думаю, что проблемы и загадки, с которыми мы здесь встречаемся, будут решены, и мы снова сможем смотреть на них с тем же чувством превосходства, или наши потомки будут смотреть на них с тем же чувством превосходства, с которым мы смотрим на людей конца девятнадцатого века, которые волновались по поводу эфира. А опыт Майкельсона-Морли... , загадки казалась им неразрешимыми. И вот в тысяча девятьсот пятом году пришел Эйнштейн, и теперь каждый школьник изучает это и чувствует <... > свое превосходство над этими тогдашними парнями. Сейчас я чувствую, что все эти дела с действием на расстоянии и отсутствием действия на расстоянии разрешатся сходным образом. Кто-то придет с ответом, с подходящей точкой зрения на эти вещи. Если удача нам улыбнется, это станет новым большим шагом типа теории относительности. Может быть, кто-то просто укажет нам на наше недомыслие, и это не приведет к новым прорывам. Но, так или иначе, я верю, что вопрос будет решен.*

Литература, содержащая описание, интерпретации и попытки преодоления ЭПР-парадокса, не поддается перечислению. И, во всяком случае, очевидно, что логическое решение должно содержать некоторое фундаментальное утверждение, касающееся либо ТО, либо КМ, либо их обеих. Ниже предлагается одно из возможных решений, связанных с уточнением концепции релятивистской причинности.

**1. Стандартная концепция причинности в теории относительности**

Без потери общности можно свести современную концепцию релятивистской причинности к утверждению о том, что передача сигнала<sup>3</sup> и энергии со скоростью, большей скорости света

<sup>1</sup>E-mail: belinsky@inbox.ru

<sup>2</sup>E-mail: shulman@dol.ru

<sup>3</sup>Прием сигнала всегда связан с поглощением энергии детектором.

в вакууме, невозможна. В свою очередь это утверждение может быть рассмотрено на примере перемещения свободно движущейся частицы с массой покоя  $m$  из точки 1 в точку 2. Сразу переходя к релятивистскому описанию, будем говорить о паре четырехмерных событий 1 и 2, между которыми таким образом устанавливается причинная связь, то есть имеет место передача (в простейшем случае - однобитового) сигнала. Выберем (в рамках понятий теории относительности) систему отсчета, жестко связанную с этой частицей, переносящей информацию и энергию из 1 в 2. В этой системе отсчета пространственные координаты частицы не меняются ( $dx = 0$ ), меняется только временная координата ( $dt > 0$ ). Поэтому квадрат 4-интервала между этими событиями будет положительным:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 = c^2 dt^2 > 0. \quad (1.1)$$

Сопоставим этой паре событий (упорядоченных во времени и/или в пространстве) вышеупомянутой частицы релятивистски инвариантное выражение для действия  $S$  свободной частицы [4]:

$$S_{12} = -mc \int_1^2 ds = -mc^2 \int_1^2 d\tau = -mc^2 T_{12}, \quad (1.2)$$

где  $ds$  - элемент 4-мерного интервала,  $d\tau$  - дифференциал собственного времени (то есть времени в системе отсчета, в которой частица покоится),  $T_{12}$  - собственное время между событиями 1 и 2. Отсюда ясно, что для цепочки последовательных переходов частицы из точки 1 в точки 2, 3, ...,  $N$  суммарное действие будет равно сумме парциальных вкладов:  $S_{1N} = S_{12} + S_{23} + \dots + S_{N-1,N}$ . Ясно также, что если изменить знак выражения, то это будет соответствовать обращению времени, то есть передаче сигнала и энергии из точки 2 в точку 1.

В вышеприведенном выражении в соответствии со стандартным пониманием принципа релятивистской причинности подразумевается, что действие  $S_{12}$  является действительной величиной, а интервал собственного времени  $T_{12}$  - времениподобный, то есть, что энергия не может распространяться со сверхсветовой скоростью.

Это легко переносится и на фотон, не обладающий массой покоя. Действительно, регистрация фотона как носителя информации связана с поглощением переносимого им импульса; соответственно, и в данном случае можно говорить о переносе из одной пространственной точки в другую некоторой порции энергии.

## 2. Как разрубить гордиев узел?

Попробуем разрубить гордиев узел конфликта между ТО и КМ за счет подходящего уточнения принципа релятивистской причинности, не нарушая, но расширяя основные аспекты его сложившегося понимания. В то же время это расширение позволит, с нашей точки зрения, глубже осознать основные представления КМ.

Как было отмечено в начальной фразе публикации, квантовая механика приводит к представлениям о возможности мгновенной редукции квантового вектора состояния. Очевидно, что понятие "нелокальность", в конце концов, равнозначно утверждению о возможности сколь угодно больших скоростей если не взаимодействия, то, по крайней мере, некоторого взаимовлияния, сущность которого нуждается в явном и ясном физическом описании.

Допустим возможность сверхсветового движения и посмотрим, что из этого следует. При сверхсветовом движении интервал  $T$  в выражении для действия  $S = -mc^2 T$  оказывается, как известно [4], мнимым, таким образом и действие  $S$  окажется мнимым.

Мнимые длительности, координаты и другие физические величины давно используются в работах по физике и смежным естественным дисциплинам и - особенно - в квантовой механике. основополагающая работа В. Гейзенберга 1925 года, собственно говоря, и началась с того, что он представил координату и импульс квантовой частицы в виде бесконечного ряда комплекснозначных гармоник (см. в [5]): амплитудам и энергиям переходов между состояниями он сопоставил амплитуды и частоты отдельных гармоник ряда. При этом оказалось, что требуется еще наложить дополнительные ограничения на правила произведения этих величин, чтобы получить в результате действительные значения физических величин. В результате новый вид умножения оказался некоммутативным. Этот факт, как и само представление физических величин в виде рядов комплексных чисел, зависящих от времени, были удивительными. Все это

поразило Макса Борна; буквально через несколько дней он вспомнил про теорию матриц, которую изучал в юности, и которая совпала с тем, что предлагал Гейзенберг. Таким образом, корректность использования аппарата комплексных величин в квантовой механике (равно как и в теории относительности со времен Минковского) уже давно не является предметом для дискуссий.

Но можно ли указать физический смысл для этой ситуации? Как ни странно, ответ оказывается положительным. Например, в теории гармонических токов комплексные величины широко используются для описания активных (апериодических) и реактивных (чисто колебательных) компонент, причем мнимые величины ставятся в соответствие именно колебательным компонентам. В общем случае комплексными величинами в этой теории оказываются и напряжения (аналоги координат), и токи (аналоги импульсов), и мощности. Например, полную (комплексную) мощность в цепи (за время, отнесенное к периоду) можно представить в виде [6]:

$$D = \frac{U_m I_m}{2} \exp[j\phi] = \frac{U_m I_m}{2} (\cos \phi + j \sin \phi), \quad (2.1)$$

где  $U_m$  - амплитуда гармонического напряжения,  $I_m$  - амплитуда гармонического тока,  $\phi$  - фазовый сдвиг между гармониками напряжения и тока,  $j$  - мнимая единица. Здесь  $\cos \phi$  соответствует активной (рассеиваемой в цепи) мощности, а  $\sin \phi$  - реактивной (колебательной) мощности.

Если ввести новую переменную

$$\psi = \sqrt{\frac{U_m I_m}{2}} \exp[j(-\phi/2)], \psi^* = \sqrt{\frac{U_m I_m}{2}} \exp[j(\phi/2)], \quad (2.2)$$

то легко видеть, что полная мощность в цепи будет равна

$$D = \psi^* \psi. \quad (2.3)$$

Вспомним теперь, как выглядит выражение для плотности вероятности, вычисленное с помощью волновой функции  $\psi$  (разумеется, никак не связанной с только что введенной электротехнической величиной):

$$p = \psi^* \psi. \quad (2.4)$$

Не правда ли, эти два выражения похожи?

Таким образом, продолжив эту аналогию, можно сказать, что Гейзенберг неявно ввел в квантовую теорию разделение процессов на два типа. Процессы первого типа соответствуют классическим аналогам, их можно непосредственно измерять (условно назовем такие процессы относительно медленными). Процессы же второго типа, которые описываются мнимыми компонентами, соответствуют чисто колебательным процессам и реализуются с очень высокими частотами, отвечающими энергиям покоя элементарных частиц (для дираковского электрона был даже изобретен подходящий термин - "zitterbewegung" или "дрожание" [7]). Среднее значение переноса энергии при этом равно нулю.

Итак, на данном этапе анализа мы можем отметить, что:

- чисто переменные во времени (колебательные) величины играют в физических теориях принципиально важную роль;
- для математического описания переменных во времени (колебательных) процессов не только подходящим, но и естественным инструментом их описания является аппарат комплексных чисел;
- когда физический процесс является исключительно колебательным (то есть не содержит апериодических составляющих), передача энергии из одной точки пространства в другую принципиально отсутствует, но это в общем случае не означает, что между данными точками принципиально отсутствует любое физическое взаимодействие. Необратимой передачи энергии и информации в данном случае действительно нет, среднее значение передаваемой в любую сторону энергии равно нулю, что в полной мере соответствует требованиям принципа релятивистской причинности.

Это и есть искомое обобщение принципа релятивистской причинности, которое позволяет добиться совместимости ТО с КМ.

### 3. Квантовые корреляции

Что означает выражение “квантовые корреляции между состояниями”? В 1935 Эрвин Шрёдингер изобрел научный термин “запутывание” (entanglement), а Эйнштейн, Подольский и Розен написали статью [8], в результате которой стало ясно: согласно квантовой механике, на какое бы (произвольно большое) расстояние не разлетелись бы в пространстве две запутанные между собой ЭПР- частицы (например, фотоны или электроны), при измерении характеристик одной из них характеристики другой оказываются в определенной связи с характеристиками первой частицы. Если произвести ряд опытов над единичными парами, то можно получить меру статистической связи между этими характеристиками, причем в предельных случаях - при определенной конфигурации измерений - эта мера может даже стать детерминистической [9]. Однако, с другой стороны, связь между запутанными частицами не может быть причинной, как отмечалось в начале статьи.

Но теперь мы опираемся на вновь предложенную нами идею: возможен более слабый - не (релятивистски) причинный! - тип физической связи, при котором не происходит необратимого переноса энергии из одной 4-точки пространства-времени в другую (отделенную от первой, возможно, пространственно-подобным интервалом). Напротив, если наша идея верна, то этот тип связи характеризуется чисто колебательным процессом и, соответственно, сверхсветовыми скоростями распространения этих колебаний.

Остановимся на анализе понятия запутанного квантового состояния ЭПР-пары. Стандартное описание имеет дело с Алисой и Бобом, которые проводят измерения каждый над своей частицей. Алиса может обнаружить свою частицу в состоянии  $a$  или  $A$ , тогда как Боб свою частицу может обнаружить в состоянии  $b$  или  $B$ . При этом, в силу запутанности частиц между собой, из четырех абстрактно возможных комбинаций ( $ab$ ,  $aB$ ,  $Ab$  и  $AB$ ) физически реализуются только две:  $ab$  и  $AB$ . То есть общий вектор состояния при наличии запутывания есть

$$|\psi_{\text{запут}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|ab\rangle + |AB\rangle). \quad (3.1)$$

Матрица плотности  $\rho_{\text{запут}}$  для этого случая имеет вид:

$$\rho_{\text{запут}} = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & 1/2 \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

То есть система с равной вероятностью  $1/2$  находится в состояниях  $|ab\rangle$  и  $|AB\rangle$  - это элементы с индексами  $[1,1]$  и  $[4,4]$ . И корреляции между этими состояниями (элементы с индексами  $[1,4]$  и  $[4,1]$ ) максимальны. Этот результат действителен до измерения, после измерения мы получаем матрицу  $\mu$  только с членами на главной диагонали:

$$\mu = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

Таким образом, в результате измерения (и вызванного этим коллапса вектора состояния) для нашего запутанного состояния мы получаем  $\rho_{\text{запут}} \rightarrow \mu$ , то есть члены, не стоящие на главной диагонали, исчезают.

Дело выглядит так, что какое бы расстояние не разделяло частицы, между ними непрерывно происходят колебательный обмен энергией<sup>4</sup>, а сама пара существует в виде суперпозиции двух основных состояний. И только в момент измерения одной из них (или ее запутывания с каким-либо иным объектом) эта суперпозиция разрушается, члены с индексами  $14$  и  $41$  исчезают, происходит декогеренция [10] (см. также сходное описание эволюции состояния кота Шрёдингера в [11]).

<sup>4</sup>Частота колебаний для фотона предположительно совпадает с его частотой, однако обычной связи со скоростью распространения света здесь быть не может (природа этих колебаний пока не известна). Частота колебаний для электрона должна соответствовать его де-бройлевской частоте [7].

Действительно, как отмечается в [10], процесс измерения сводится к взаимодействию измеряемой системы с другой системой - измерительным прибором или некоторой средой (окружением), и это ведет к тому, что состояния измеряемой системы и прибора (окружения) становятся запутанными, между ними возникает квантовая корреляция. В то же время исчезают корреляция и запутанность между двумя исходными частицами. Если такой механизм верен, то открывается возможность поставить и исследовать вопрос о скорости редукции вектора состояния для такой суперпозиции. В самом деле, в [11] приводятся аналитическая и численная оценки для характерного времени возникающего процесса декогеренции; типичная величина длительности декогеренции может составить порядка  $10^{-23}$  с.

Добавим несколько слов о возможном механизме обмена информацией без обмена энергией. Когда мы рассматриваем классический периодический процесс (например, переменный электрический ток), то даже при отсутствии активных потерь говорить о нулевой передаче энергии можно лишь в среднем и притом за время, кратное числу периодов. Если же рассматривается время меньшее, чем период процесса, то количественная мера переданной энергии всегда может быть не только определена теоретически, но и измерена практически.

Ситуация становится принципиально иной, когда мы переходим в существенно квантовую область и рассматриваем так называемые “нулевые” колебания поля. Так, в электромагнитном вакууме, отвечающем состоянию поля с наименьшей энергией, средняя (по пространству) напряженность поля и число фотонов равны нулю, однако средние (по времени) значения квадратов напряженности электрического и магнитного полей отличны от нуля. Это проявляется косвенным образом, например, в эффекте Лэмба [12], в эффекте Казимира [13], в затравочном поле параметрического генератора света (см., например, [14, 15]). Мы уверены в том, что энергия этих “нулевых” колебаний вакуума не может быть извлечена непосредственно (например, в акте измерения), поскольку отвечает состоянию с наименьшей возможной энергией. Таким образом, в данном случае необратимый и отличный от нуля обмен энергией оказывается принципиально невозможным.

#### 4. Сверхсветовые скорости

В теории относительности считается невозможным превысить скорость света, что “закреплено” так называемой формулой сложения скоростей (см., например, [4]). Пусть система отсчета  $K'$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $V$ . Пусть  $v$  есть скорость в системе  $K$ , а  $v'$  - скорость той же частицы в системе  $K'$  (для простоты полагаем, что все скорости совпадают по направлению). Тогда

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}}, \quad (4.1)$$

где  $c$  - скорость света. Легко видеть, что сумма двух скоростей, меньших или равных скорости света, действительно не может быть больше  $c$ .

В этой связи хотелось бы напомнить одну поучительную историю. В 1916 году К. Шварцшильд нашел решение уравнений Эйнштейна, описывающего черную дыру. Метрика Шварцшильда имеет вид (см. в [16], [17]):

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{r_s}{r}\right)} - r^2(\sin^2\theta d\phi^2 + d\theta^2), \quad (4.2)$$

где  $ds$  - 4-мерный интервал,  $c$  - скорость света,  $dt$  - интервал координатного времени,  $r$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  - радиальная и угловые координаты,  $r_s = 2GM/c^2$  - радиус Шварцшильда ( $M$  - масса черной дыры). Легко видеть, что при значении радиуса, равного радиусу Шварцшильда, во втором слагаемом возникает бесконечность из-за нуля в знаменателе. Физически это приводит к тому, что с точки зрения удаленного от черной дыры наблюдателя падение объекта на горизонт событий черной дыры “затягивается” до бесконечности, и возникает впечатление, что дальнейшего описания процесса получить невозможно. При таком переходе через горизонт событий (когда  $r = r_s$ ) множители при дифференциалах координат Шварцшильда  $dt$  и  $dr$  меняют знаки, и координаты как бы меняются ролями - роль пространственной координаты берет на себя временная, и наоборот.

Однако спустя 17 лет Ж. Лемэтр показал (см. в [16]), что вышеуказанная бесконечность - не

реальная сингулярность, и что она может быть устранена переходом к новой системе координат:

$$d\tau = dt + \sqrt{\frac{r_s}{r}} \frac{1}{1 - \frac{r_s}{r}} dr; \quad d\rho = dt + \sqrt{\frac{r}{r_s}} \frac{1}{1 - \frac{r_s}{r}} dr, \quad (4.3)$$

в которой метрика принимает вид:

$$ds^2 = d\tau^2 - \frac{r_s}{r} d\rho^2 - r^2 (\sin^2\theta d\phi^2 + d\theta^2), \quad \text{где } r = \left[ \frac{3}{2}(\rho - \tau) \right]^{2/3} r_s^{1/3}. \quad (4.4)$$

Правда, в этой системе, как можно видеть, новые временная и радиальная координаты выражаются сразу через временную и радиальную координату старой системы, так что переход не вполне тривиален, зато сингулярность теперь имеет место там, где и должна быть, то есть в геометрическом центре черной дыры. Но самое главное то, что теперь открылась возможность для описания процессов внутри черной дыры. И создалась удивительная ситуация: в одной системе координат горизонт событий черной дыры (неразрывно связанный с преодолением светового барьера) остается как бы непреодолимым, а в другой системе координат вполне может быть преодолен (правда, только в одну сторону) падающим объектом.

В самом деле, если в координатах Шварцшильда скорость падающего из бесконечности материального объекта замедляется до нуля на горизонте событий черной дыры, то в новых координатах эта скорость достигает значения  $c$  на горизонте, а при пересечении горизонта - уже внутри черной дыры - равна  $(dr/dt_{pr})_{\text{объекта}} = -c\sqrt{r_s/r}$  (напомним, что  $t_{pr}$  - собственное время сопутствующего объекту наблюдателя), то есть растет до бесконечности в ее центре (в точке сингулярности). При этом и скорость света, измеренная в этой же системе координат, уже не равняется в этой области константе  $c$ , а равна  $(dr/dt_{pr})_{\text{света}} = -c(1 + \sqrt{r_s/r})$ , а значит, также неограниченно растет, неизменно превышая по абсолютной величине скорость падающего в сингулярность тела [17].

Дальнейшие исследования связаны с именем В. Риндлера, исследовавшего систему координат, связанной с которой наблюдатель в собственной системе отсчета испытывает равномерное ускорение (см. в [18]). Очевидно, что рано или поздно (на самом деле - весьма быстро) он должен достичь скорости света (в точности, как при падении в черную дыру), и...? Правильно, в системе координат удаленного наблюдателя последующий его жизненный путь увидеть не удастся. Но Риндлер опять-таки предложил новую систему координат, состоящую из двух несвязанных областей (клиньев Риндлера), ограниченных горизонтами событий. Дальше про горизонты и возникающие квантовые корреляции (а речь фактически идет о знаменитом излучении Хокинга) можно прочитать в [18]:

*<...> В действительности горизонты могут быть воспроизведены в условиях обычного эксперимента на кухне. Пусть вода вытекает из крана на металлическую поверхность <...>. Внутри определенного кольца водная поверхность очень гладкая, но вне его появляются волны. Когда поток из крана достигает металла, скорость воды превышает скорость распространения волны. Тогда вода вытекает и замедляется. Волны не могут попасть в зону, где скорость воды превышает их скорость, но формируются при критическом значении радиуса, где скорость воды становится равной скорости волн. В механике сплошных сред <...> это явление известно как гидравлический скачок. С астрофизической точки зрения гидравлический скачок подобен белой дыре - объекту, куда ничто не может проникнуть. Белые дыры - это обращенные во времени черные дыры; если мы снимем наш кухонный эксперимент на пленку и будем просматривать этот фильм в обратном порядке, то будет казаться, что вода впадает в кран.*

Автор [18], используя для ситуации по обе стороны гидравлического скачка ее описание с помощью системы координат Риндлера, разделенной на два пространственно-временных клина, пишет:

*<...> Вообразим двух наблюдателей на двух сопряженных риндлеровых траекториях, один на пространственно-временной гиперболе с фиксированной положительной величиной собственного ускорения (на правой стороне риндлерова клина), а второй наблюдатель - на траектории с отрицательной величиной ускорения (на левой стороне риндлерова клина) <...>. Оба наблюдателя являются частью одной и той же пространственно-временной системы координат на риндлеровой диаграмме <...>. Вместо вакуума Минковского два ускоренных наблюдателя наблюдают ЭПР-состояния.*

Оба ускоренных наблюдателя по отдельности воспринимают вакуум Минковского как тепловое излучение, но если сравнить их записи после этапа ускорения, то можно обнаружить, что тепловые фотоны оказывались всегда коррелированными. Столкновения, которые их замедляют, оказываются, были синхронизированы! Таким образом, по видимости случайные события, порожденные квантовым вакуумом, были скоррелированы поверх пространства; они были запутанными <...>.

Два партнера по наблюдению находятся в разных сторонах клина Риндлера, они разделены горизонтом. Горизонт является пространственно-временной поверхностью, где ускорение настолько велико, что наблюдатель должен мгновенно достичь скорости света.

Таким образом, мы вправе предположить, что световой барьер и сверхсветовые скорости все-таки имеют определенные права на физическое описание, только для этого требуется использование нетривиальных систем координат.

## Заключение

Мы предполагаем, что представление о мнимой (реактивной) энергии позволяет лучше понять не только нелокальные корреляции между частицами ЭПР-пары, но и другие феномены, например, туннелирование частицы сквозь потенциальный барьер; смотри, в частности, работу [19], где указывается, что пик туннелирующего волнового пакета действительно может оказаться на дальней стороне барьера быстрее, чем если бы он перемещался со световой скоростью. Однако эти “гладкие” волновые пакеты не могут переносить информацию; фактически передается только небольшая часть переднего фронта гауссианы. Таким образом, в этих нелокальных эффектах релятивистская причинность не нарушается. Смотри также работу [20], в которой утверждается, что туннелирующая сквозь потенциальный барьер частица проводит в этой области чисто мнимое время. Дж. Белл [3] так высказался относительно аргументации А. Эйнштейна по поводу неполноты КМ:

*В 1935 году он придумал чрезвычайно сильный аргумент для занимаемой им позиции, основанный на другой гипотезе, которую большинство людей, ранее не имевшим дела с этим феноменом, ранее принимали; это - гипотеза близкодействия (no action at a distance), которое иногда называют локальной причинностью (local causality) или просто локальностью (locality). И он заявил, что имеются ситуации, где из этой гипотезы следует детерминизм. Так что его аргумент в пользу детерминизма перестал быть гипотезой, а стал теоремой, следующей из аксиомы локальности.*

Сам Белл открыл нарушение подобной аксиомы локальности именно в процессе исследования полноты КМ. Таким образом, если признавать результаты многочисленных опытов и быть последовательным, то необходимо безоговорочно принять тезис о чрезвычайно быстром распространении вектора квантового состояния (но с ограничением скорости передачи активной энергии и информации скоростью распространения света в вакууме) и приступить к исследованию конкретного формализма, позволяющего корректно и адекватно это описывать.

Работы, в которых авторы ставят перед собой именно такие задачи, существуют. Например, в работе [21] предлагается диффузионно-волновая модель на основе уравнения параболического типа для тепловых полей в вакууме. С математической точки зрения диффузионные волны характеризуются тем, что в определяющее их уравнение входит только первая производная по времени. Они обладают волноподобными возмущениями, характеризующимися когерентными и всегда вынужденными колебаниями энергии диффузии частиц. Их поведение демонстрирует бесконечную скорость распространения возмущений вдоль целых областей [21]. Хотя предлагаемая модель вызывает ряд вопросов, характерно, что ее автор в заключение отмечает: одним из самых жгучих является вопрос о том, как это примирить с релятивистским описанием.

Подведем итоги предложенных в нашей работе новых представлений.

1. Утверждение теории относительности о невозможности для материальных объектов превысить скорость распространения света в вакууме кажется нам не абсолютным: в системе отсчета удаленного наблюдателя это действительно так, но в системе отсчета ускоренного наблюдателя пересечение условного порога - горизонта событий (в одну сторону) оказывается возможным, при этом по обе стороны горизонта могут возникать квантово скоррелированные фотоны.

2. Это позволяет нам допустить к физическому рассмотрению чисто колебательные процессы, распространяющиеся со сверхсветовой (в системе удаленного наблюдателя) скоростью. В таких процессах не происходит передачи средней энергии, а значит, строго говоря, не происходит нарушения принципа релятивистской причинности. В то же время физическое взаимовлияние между, например, двумя частицами - партнерами ЭПР возможно, поскольку среднеквадратичная энергия взаимодействия больше нуля (как в случае нулевых флуктуаций электромагнитно

поля), что и приводит, с нашей точки зрения, к квантовым корреляциям - более слабой форме взаимодействия, нежели причинное. Интересно, что с математической точки зрения колебательные процессы адекватно описываются мнимыми числами, что соответствует мнимым значениям 4-интервала и 4-действия в пространстве Минковского.

3. Мы поддерживаем тезис о том, что запутывание разрушается при измерении вследствие сопутствующей декогеренции одной частицы из ЭПР-пары, когда запутанная частица декогерирует вследствие взаимодействия с окружением; например, автор [11] пишет:

*В процессе обработки квантовой информации декогеренция играет двоякую роль. Прежде всего, она несет угрозу квантовой сущности квантовой информации, она разрушает квантовые суперпозиции и, таким образом, превращает квантовые компьютеры в классические (в лучшем случае), уничтожая огромные возможности, предоставляемые специфически квантовыми алгоритмами. Однако декогеренция является также необходимым (часто требующим подтверждения) элементом обработки квантовой информации, который должен, в конце концов, обеспечивать завершение "измерения".*

*Роль измерения состоит в преобразовании квантовых состояний и квантовых корреляций (с их характерной неопределенностью и расплывчатостью) в классические, определенные исходы.*

Нам представляется, что перспективы дальнейших исследований связаны с установлением скорости редукции вектора состояния для такой пары на базе ЭПР-опытов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Christensen B., Liang Y.Ch., Brunner N., Gisin N., Kwiat P. Exploring the limits of quantum nonlocality with entangled photons // arXiv:1506.01649v1 [quant-ph]. URL: <http://arxiv.org/pdf/1506.01649v1.pdf>
2. Salart D., Baas A., Branciard C., Gisin N., Zbinden H. Testing spooky action at a distance // arXiv:0808.3316v1 [quant-ph]. URL: <http://arxiv.org/pdf/0808.3316v1.pdf>
3. Bell J.S. Indeterminism and nonlocality // Mathematical Undecidability, Quantum Nonlocality and the Question of the Existence of God / edited by A. Driessen, A. Suarez. Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 83-100. URL: <http://www.quantumphil.org/Bell-indeterminism-and-nonlocality.pdf>
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс теоретической физики. Т.2. Теория поля. М.: Наука, 1967. 460 с.
5. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. М.: Наука, 1985. 384 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996. 625 с.
7. Schrödinger E. Über die kräftefreie Bewegung in der relativistischen Quantenmechanik // Sitzungsberichte der Königlich Preubischen Akademie der Wissenschaften. 1930. P. 418-428.
8. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // Phys. Rev. 1935. Vol. 47. Issue 10. P. 777-780.
9. Белинский А.В., Клышко Д.Н. Интерференция света и теорема Белла // УФН. 1993. Т. 163. № 8. С. 1-45.
10. Менский М.Б. Квантовые измерения и декогеренция. Модели и феноменология. М.: Физматлит, 2001. 232 с.
11. Zurek W.H. Decoherence and the Transition from Quantum to Classical // Los Alamos Science. 2002. № 27. P. 1-25.
12. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1989. 704 с.
13. Мостепаненко В. М., Трунов Н.Н. Эффект Казимира и его приложения // УФН. 1988. Т. 156. Вып. 3. С. 385-426.
14. Белинский А.В. Квантовые измерения. М.: Бином, 2008. 182 с.
15. Белинский А.В., Тарасова Т.М. К теории параметрической генерации света // Вестник московского ун-та. Серия 3. Физика и астрономия. 2015. № 4. С. 47-53.
16. Lemaitre G. The Expanding Universe // General Relativity and Gravitation. 1997. Vol. 29. P. 641-680.
17. Мизнер Ч., Торн К, Уилер Дж. Гравитация. Т3. М.: Мир, 1973. 510 с.
18. Leonhardt U. Essential quantum optics: from quantum measurements to black holes. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 301 p.
19. Chiao R.Y., Kwiat P. , Steinberg A.M. Quantum Nonlocality in Two-Photon Experiments at Berkeley // arXiv:9501016v1 [quant-ph]. URL: <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/9501016.pdf>



20. Chao W. The Imaginary Time in the Tunneling Process // arXiv:0804.0210 [quant-ph]. URL: <http://arxiv.org/pdf/0804.0210v1.pdf>
21. Grössing G. The vacuum fluctuation theorem: Exact Schrödinger equation via Nonequilibrium Thermodynamics // Phys. Lett. A. 2008. Vol. 372. Issue 25. P. 4556–4563. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0808/0808.3539.pdf>

Поступила в редакцию 25.04.2016

Белинский Александр Витальевич, д.ф.-м.н., профессор, физический факультет, Московский государственный университет, 19991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: [belinsky@inbox.ru](mailto:belinsky@inbox.ru)

Шульман Михаил Хананович.

E-mail: [shulman@dol.ru](mailto:shulman@dol.ru)

**A. V. Belinsky, M. H. Shulman**

### **Quantum correlations and Superluminal interaction**

**Keywords:** relativity, quantum mechanics, correlation, Einstein-Podolsky-Rosen paradox, superluminal velocity, relativistic causality, event horizon, density matrix, reference frame, Schwarzschild metric, Lemaitre metric, Rindler horizon, entangled state.

PACS: 03.65.Ud

The paper attempts to solve the well known conflict between Relativity and Quantum Mechanics. Accordingly to our concept the instant correlations between the EPR-partners can be explained by some oscillations existence whose propagation velocity may overcome the velocity of light in vacuum. In such process any irreversible transport of energy and information is absent, so the relativistic causality principle is satisfied.

#### REFERENCES

1. Christensen B., Liang Y.Ch., Brunner N., Gisin N., Kwiat P. Exploring the limits of quantum nonlocality with entangled photons, *arXiv:1506.01649v1 [quant-ph]*. <http://arxiv.org/pdf/1506.01649v1.pdf>
2. Salart D., Baas A., Branciard C., Gisin N., Zbinden H. Testing spooky action at a distance, *arXiv:0808.3316v1 [quant-ph]*. <http://arxiv.org/pdf/0808.3316v1.pdf>
3. Bell J.S. Indeterminism and nonlocality, *Mathematical Undecidability, Quantum Nonlocality and the Question of the Existence of God*, Kluwer Academic Publishers, 1997, pp. 83-100. <http://www.quantumphil.org/Bell-indeterminism-and-nonlocality.pdf>
4. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Kurs teoreticheskoy fiziki. Tom 2. Teoriya polya* (Course of theoretical physics. V.2. Theory of field), Moscow: Nauka, 1967, 460 p.
5. Jammer M. *The conceptual development of quantum mechanics*, New York: Mc Graw-Hill, 1967, 412 p.
6. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie cepi* (The theoretical grounds of electrical engineering. Electrotechnical circuits), Moscow: Vyshaia Shcola, 1996, 625 p.
7. Schrödinger E. On the free movement in relativistic quantum mechanics, *Sitzungsberichte der Königlich Preubischen Akademie der Wissenschaften*, 1930, pp. 418-428.
8. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.*, 1935, vol. 47, issue 10, pp. 777-780.
9. Belinskii A.V., Klyshko D.N. The interference of light and Bell's theorem, *Physics Uspekhi*, 1993, vol. 36, no. 8, pp. 1-45.
10. Mensky M. B. *Kvantovye izmereniya i dekoherenciya. Modeli i fenomenologiya* (Quantum Measurements and Decoherence. Models and Phenomenology), Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2000, 226 p.
11. Zurek H. Woitech. Decoherence and the Transition from Quantum to Classical, *Los Alamos Science*, 2002, no. 27, pp. 1-25.
12. Berestetskii V.B., Lifshitz E.M., Pitaevskii L.P. *Kvantovaya elektrodinamika* (Quantum electrodynamics), Moscow: Nauka, 1989, 704 p.
13. Mostepanenko V. M., Trunov N. N. Kazimir's effect and its applications, *Usp. Fiz. Nauk.*, 1988, vol. 156, no. 3, pp. 385-426.
14. Belinskii A.V. *Kvantovye izmereniya* (Quantum Measurements), Moscow: Binom, 2008, 182 p.

15. Belinskii A.V., Tarasova T.M. To the parametric generation of light theory, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 3. Physica i Astronomia*, 2015, no. 4, pp. 47-53.
16. Lemaitre G. The Expanding Universe, *General Relativity and Gravitation*, 1997, vol. 29, pp. 641-680.
17. Misner Ch., Thorn K., Wheeler J. *Gravitacia* (Gravitation), Moscow: Mir, 1973, vol. 3, 510 p.
18. Leonhardt U. *Essential quantum optics. From quantum measurements to black holes*, Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 301 p.
19. Chiao R.Y., Kwiat P.G., Steinberg A.M. Quantum Nonlocality in Two-Photon Experiments at Berkeley, *arXiv:9501016v1 [quant-ph]*. <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/9501016.pdf>
20. Chao W. The Imaginary Time in the Tunneling Process. *arXiv:0804.0210 [quant-ph]*. <http://arxiv.org/pdf/0804.0210v1.pdf>
21. Grössing G. The vacuum fluctuation theorem: Exact Schrödinger equation via Nonequilibrium Thermodynamics, *Phys. Lett. A.*, 2008, vol. 372, issue 25, pp. 4556–4563. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0808/0808.3539.pdf>

Received 25.04.2016

Belinsky Alexandr Vitalievich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Physics, Moscow State University, Leninskiye Gory, 1-2, Moscow, 19991, Russia.

E-mail: [belinsky@inbox.ru](mailto:belinsky@inbox.ru)

Shulman Mikhail Hananovich.

E-mail: [shulman@dol.ru](mailto:shulman@dol.ru)