



МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ПЕРЕПУТАННЫХ СОСТОЯНИЙ НА ОСНОВЕ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

П.В. Куракин, Г.Г. Малинецкий

Развивается предложенная авторами в предыдущей работе оригинальная модель «игрушечной» квантовой механики со скрытыми параметрами, не противоречащая теореме Белла и всем известным экспериментам. Модель представляет собой клеточный автомат, описывающий упрощенный двухчастичный эксперимент с перепутанными состояниями.

Введение

Принято считать, что невозможно построить локальную теорию с физическим полем (скрытыми параметрами), эволюционирующим в пространстве-времени, дающую те же предсказания, что квантовая механика. Теорема о скрытых параметрах была впервые сформулирована Беллом в [1]. Усовершенствованный вариант теоремы и соответствующий эксперимент были предложены в работе [2]. Еще один вариант этого же эксперимента был проведен авторами [3].

Суть эксперимента без технических деталей состоит в следующем. Из одной точки в результате двухкаскадного атомного перехода излучаются два фотона в противоположных направлениях. В таком излучательном процессе поляризации двух фотонов коррелированы, но до регистрации фотонов они не известны. При регистрации каждого фотона становится известной и его поляризация, так как перед попаданием в детектор фотон проходит поляризатор с переключаемым направлением оси поляризации. Важно, что время переключения поляризатора меньше L/c , где c - скорость света, L - расстояние между детекторами. Корреляция поляризации фотонов согласно эксперименту существует в любой момент времени и не переносится никаким сигналом, что, как считается, подтверждает невозможность существования скрытых параметров.

В данной работе, тем не менее, предложена принципиальная (то есть сильно упрощенная, «игрушечная») модель описанного эксперимента в духе реалистичных теорий со скрытыми параметрами. Показано, что эта модель не противоречит ни теореме Белла, ни предсказаниям квантовой механики, а проведенные ранее эксперименты *ничего не говорят о теориях такого класса.*

1. Модель эксперимента Белла в духе реалистичных теорий

(а) Примем для простоты, что спины (поляризации) двух частиц принимают значения ± 1 , при этом суммарный спин частиц после их регистрации должен оказаться равным строго 0. Реальная корреляция поляризаций фотонов описывается, разумеется, несколько сложнее, но мы, напомним, *качественно* рассматриваем *принципиальную* сторону явления.

Распространение излученных «фотонов» будем описывать при помощи одномерного клеточного автомата, правила которого будут ясны из дальнейшего.

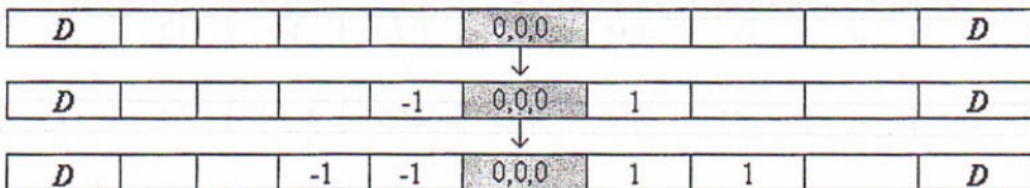
Состояние каждой ячейки автомата описывается тремя полями:

- первое поле может принимать значения 0, ± 1 и указывает направление движения фотона;

- второе и третье поля также могут принимать значения 0, ± 1 и означают спин соответствующей частицы.

Значение 0 первого поля зарезервировано для ячейки, в которой произошло излучение. Совпадение *ненулевых* значений второго и третьего полей говорит о том, что значение спина соответствующего «фотона» уже predetermined (это еще не означает, что произошла регистрация - см. ниже).

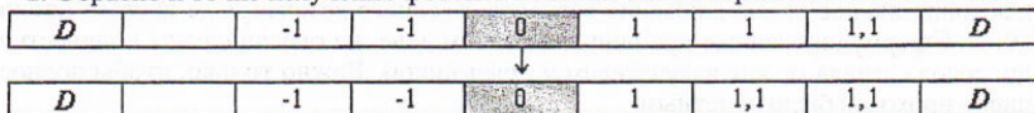
(б) После излучения «фотонов» происходит следующее. В обе стороны от точки излучения распространяется информация о «фотонах», содержащаяся в первом поле ячеек:



Значки *D* на схеме означают детекторы «фотонов». Для удобства они изображены равноудаленными от места излучения, но это вовсе не обязательно. Видно, что оба «фотона» пока не имеют определенного спина, но известно направление движения каждого из них. Существование информации об импульсе *до регистрации* частиц можно оспорить с позиций квантовой механики, но мы делаем допущение о наличии этой информации для простоты, чтобы сосредоточить внимание *только на явлении регистрации спинов «фотонов»*.

(в) Сигналы в обе стороны движутся в *среднем* с одинаковыми скоростями. Эта оговорка сделана потому, что, вообще говоря, нами во всех моделях данного класса [4, 5] не предполагается синхронное обновление состояний ячеек автомата. Это значит, что на каждом *элементарном шаге* случайно выбираются две соседние ячейки и происходит их взаимодействие - в простейшем случае копирование информации из занятой ячейки (с сигналом) в пустую. Единичный *временной такт* состоит в том, что в случайном порядке выбираются *все* пары ячеек в линейке. Случайная, причем локальная, синхронизация ячеек пространства представляется физически более правдоподобной, чем глобальная синхронизация, как в обычных клеточных автоматах.

(г) Пусть (независимо от того, равноудалены детекторы от точки излучения или нет) один из сигналов достиг детектора, тогда происходит следующее. Детектор случайным образом (см. ниже) выбирает одно из двух значений спина, что выражается в принятии 2-м полем значения 1 либо -1. Обратно к точке излучения фотонов побежит волна переключений 2-го поля:



Когда этот сигнал достигнет точки испускания «фотонов» (0-ячейка) - он определит ее по значению 0 первого поля - предложенное детектором значение спина либо подтвердится, либо будет отвергнуто. Это означает, что 0-ячейка установит во втором поле значение 1 либо -1, а в третьем поле - противоположное значение:

<i>D</i>		-1	-1	0,-1,1	1,1	1,1	1,1	<i>D</i>
----------	--	----	----	--------	-----	-----	-----	----------

В изображенном случае произошел отказ правому детектору. Теперь значения спинов, которые будут зарегистрированы, предопределены: правый получит значение -1, а левый 1. Важно отметить, что даже если два сигнала от двух детекторов одновременно достигли 0-ячейки, то ввиду случайной попарной синхронизации ячеек только один из них *первым* взаимодействует с ней и инициирует розыгрыш спинов между частицами.

Правила для 0-ячейки могут быть и другими - первый пришедший сигнал запроса получает подтверждение, то есть розыгрыш не производится. Поскольку мы обсуждаем *общую* схему возможных полевых теорий, для нас это не так существенно (см. обсуждение в разделе 2).

(д) Далее значение второго поля будет передаваться вправо, а значение третьего поля - влево, причем в дублированном виде - одновременно во втором и третьем полях. Это дублирование означает, что данный «вердикт» окончателен:

<i>D</i>	-1	-1	-1,11	0,0,0	1,-1-1	1,1	1,1	<i>D</i>
----------	----	----	-------	-------	--------	-----	-----	----------



<i>D</i>	-1	-1,11	0,0,0	0,0,0	0,0,0	1,-1-1	1,1	<i>D</i>
----------	----	-------	-------	-------	-------	--------	-----	----------



<i>D</i>	-1,11	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	1,-1-1	<i>D</i>
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	----------

После того, как 0-ячейка передала информацию в обе ветки, все ее поля обнуляются. По мере распространения «окончательных приговоров» вправо и влево ячейки также обнуляются.

В конце эволюции системы все ячейки обнулели, кроме ячеек с детекторами, где записаны значения *измеренных* спинов частиц (не обязательно одновременно):

<i>D, 1</i>	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	0,0,0	<i>D, -1</i>
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------------

Именно в тот момент, когда ячейка с признаком *D* приобретает запись 1 или -1, происходит «регистрация» частицы с точки зрения экспериментатора.

2. Обсуждение

(а) Сразу необходимо подчеркнуть, что модель не описывает *в точности* эксперимент, приведенный в [3], так как там поляризационные оси оптических кристаллов менялись во времени, а в нашей модели - нет. Но, как мы подчеркнули в самом начале, цель работы - продемонстрировать, как *в принципе* могут строиться модели такого рода.

Поясним, что мы имеем в виду. В [3] оптические оси детекторов периодически переключаются с характерным временем порядка 10 нс, в то время как минимальное время движения сигналов от одного детектора до другого около 40 нс. Сформулированные принципы, на самом деле, не ограничивают количество проходов сигнала между излучателем и приемником. Важно только, чтобы полное число проходов было нечетным.

Если *последняя* пара сигналов «запрос - ответ» успевает сделать проход «туда и обратно» за указанное время - приблизительно 10 нс (пока «пожелание» кристалла постоянно), то согласование «спинов» в 0-ячейке возможно и для меняющихся во времени осей.

(б) В экспериментах по теореме Белла регистрирующие приборы характеризуются двумя настраиваемыми параметрами a и b - это направления главных осей двоякопреломляющих кристаллов. Каждый фотон попадает в один из двух детекторов в зависимости от того, прошел ли он через кристалл в обыкновенном или в необыкновенном луче.

Если с обеих сторон установки измерительные базисы совпадают ($a=b$), то эксперимент происходит *в точности*, как в нашей модели: поляризации детектируемых фотонов *строго* совпадают. При наличии угла φ между главными осями вероятность обнаружить фотоны в обыкновенных лучах $P \propto \cos^2 \varphi$.

Наша модель описывает простейший случай корреляции спинов.

(в) Одно из *основных допущений* в [2], положенных в основу доказательства теоремы (точнее, вывода корреляционных неравенств), состоит в том, что статистическое распределение $\rho(\lambda)$ скрытых параметров λ , характеризующее ансамбль измерений, *не зависит* от параметров a и b .

В нашей модели скрытыми параметрами λ являются значения третьих полей элементарной ячейки. Из характера работы описанной модели очевидно, что распределение $\rho(\lambda)$ *существенно* зависит от значений a и b , так как ими определяется характер запросов, посылаемых детекторами к 0-ячейке.

Таким образом, тип динамики наших скрытых параметров в принципе не попадает в область применения теоремы Белла. А это значит, что проведенные эксперименты по проверке неравенств Белла **ничего не говорят** о данной модели.

(г) Зависимость статистики скрытых параметров от настройки измерительных приборов в модели фактически вызвана тем, что скорость распространения сигналов *больше скорости движения частиц, в случае фотонов - скорости света*. Это необычно, но ничему не противоречит, поскольку сигналы не наблюдаемы - на то они и скрытые параметры.

Важно понять, что принципами специальной теории относительности ограничена скорость перемещения только *макроскопически зарегистрированной* информации. В терминах модели такой информацией является получение ячейкой с детектором дублированного сигнала 11 или -1-1. Одиночные сигналы содержат *недублированную* информацию о регистрируемой частице, и они сами по себе *не наблюдаемы*.

Вполне можно предположить, что Природа в принципе устроена так, что в эксперименте наблюдается только продублированная информация волн скрытых параметров. Тогда предложенная модель, с одной стороны, объясняет, как квантовые эффекты могут описываться локально, в духе классических теорий поля, а с другой стороны, не противоречит существующим теориям и экспериментальным данным.

(д) В заключение хотелось бы отметить одно принципиальное отличие описанной модели от нашей предыдущей разработки [5]. В *данной* модели, несмотря на «согласование» спинов в точке излучения, время движения *каждого* из двух перепутанных «фотонов» к своему детектору пропорционально расстоянию. То есть пространство здесь является однородным. Только в таком пространстве и имеет смысл понятие «скорость частицы».

Дело в том, что «пари» в 0-ячейке разыгрывается немедленно, как только туда придет первый сигнал запроса, не дожидаясь такого сигнала от второго «фотона».

Модель в [5] изображала неоднородное пространство - скорость одиночного

«фотона» зависела от расстояния, так как в отличие от описанной здесь модели место розыгрыша пари не было фиксированным. То есть момент регистрации частицы зависел от розыгрыша «лотерей» в точках, заранее не известных.

Библиографический список

1. Bell J.S. Physics 1. 1965. 195.
2. Clauser John F., Horne Michael A., Shimony Abner, Holt Richard A. Proposed experiment to test local hidden-variable theories // Phys. Rev. Lett. 1969. Vol. 23, № 15. P. 880.
3. Aspect Alain, Dalibard Jean. Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers // Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 49, № 25. P. 1804.
4. Куракин П.В., Малинецкий Г.Г. Клеточные автоматы с псевдоквантовой эволюцией. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 70. 2001.
5. Куракин П.В., Малинецкий Г.Г. Клеточный автомат «Игрушечная квантовая механика» // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2003. Т. 11, № 1. С. 71.

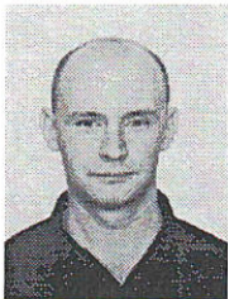
Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН, Москва

Поступила в редакцию 11.03.2003

MODELING OF ENTANGLED QUANTUM STATES BASED ON CELLULAR AUTOMATA

P.V. Kurakin, G.G. Malinetsky

Proposed is a development of our previous model of «toy quantum mechanics» with hidden variables, which does not contradict to Bell's Theorem. The model here is cellular automaton describing two-particles experiment with entangled states.



Куракин Павел Вячеславович - родился в Москве (1970), окончил МФТИ (1993). Младший научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, аспирант РАН. Область научных интересов: явления самоорганизации в вероятностных системах; реалистичные (в духе классической теории поля) формулировки квантовой механики. Имеет 9 научных публикаций, из них 6 - в отечественных и зарубежных журналах. E-mail: kurakin@niiteploprigor.ru.



Малинецкий Георгий Геннадьевич - родился в Уфе (1956), окончил физический факультет МГУ (1979), защитил кандидатскую диссертацию на тему «Нестационарные диссипативные структуры в нелинейных средах» (1982) и докторскую диссертацию на тему «Диффузионный хаос и новые типы упорядоченности в нелинейных средах» (1990) в Институте прикладной математики РАН. В настоящее время работает заместителем директора ИПМ, а также профессором кафедры прикладной математики МФТИ. Автор большого количества статей в области исследования хаоса и нелинейных явлений, а также учебника «Структуры, хаос, вычислительный эксперимент. Введение в нелинейную динамику».

E-mail: gmalin@spp.keldysh.ru