



## КЛЕТОЧНЫЙ АВТОМАТ «ИГРУШЕЧНАЯ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА»

П.В. Куракин, Г.Г. Малинецкий

Предлагается оригинальная модель игрушечной квантовой механики со скрытыми параметрами, не противоречащая теореме Белла.

### Введение

(а) Клеточные автоматы (КА) играют значительную роль в нелинейной динамике, но область применения этого инструмента моделирования, к сожалению, уже зафиксировалась и давно не расширяется. В основном КА оказались полезными для мягкого моделирования в областях, где есть те или иные физические поля или пространственно распределенные величины: гидродинамика, физика плазмы, химические системы, нейронные системы, молекулярная биология, динамика популяций и т.п. Представляется, однако, что КА заняли далеко не всю нишу своих возможностей и принципиальных преимуществ перед другими языками и средами моделирования. Речь идет об области физики, до сих пор бывшей совершенно недоступной для КА, - квантовой механике.

Дело в том, что в квантовой механике нет таких полей и пространственно распределенных величин. Принято считать, что квантовая механика нелокальна, то есть невозможно построить локальную теорию с физическим полем (скрытыми параметрами), эволюционирующим в пространстве-времени, дающую те же предсказания, что квантовая механика.

(б) Теорема о скрытых параметрах была впервые сформулирована Беллом в [1]. Усовершенствованный вариант теоремы, легче допускающий экспериментальную проверку, был предложен в [2].

Р. Фейнман обосновывал аналогичные положения в отличной, но близкой формулировке [3]: «...невозможно представить результаты квантовой механики на классическом универсальном [вычислительном] устройстве», даже если использовать вероятностные алгоритмы на этом устройстве. Именно поэтому для *точного* моделирования квантовых систем Р. Фейнман предложил создать квантовый компьютер, то есть моделировать эволюцию квантовых систем другими квантовыми системами.

(в) В данной работе предложена оригинальная модель «игрушечной» квантовой частицы в духе локальных теорий со скрытыми параметрами (в другой терминологии - *реалистичных* теорий). Показано, почему эта модель принципиально *не противоречит* указанным теоремам.

В качестве инструмента моделирования выбраны именно КА, поскольку речь идет о мягком моделировании.

## 1. Что такое игрушечная частица

Термины «игрушечная квантовая механика» и «игрушечная частица» означают, что модель не описывает реальные физические системы, а лишь демонстрирует *принципиальную возможность* построения соответствующей теории. Это очень важно понимать.

Игрушечная частица представляет только одно свойство реальных квантовых частиц: она может переходить из одного *зарегистрированного* локализованного состояния в другое. Поле скрытых параметров есть в каждой точке пространства, однако в «эксперименте» регистрируются только два пространственно разнесенных события: испускание частицы и ее попадание в измерительный прибор.

Иными словами, предлагаемая модель *качественная*, она принадлежит к тому же классу, что и знаменитая модель связанных вихрей Дж.К. Максвелла [4] (эта модель предшествовала созданию Максвеллом точных уравнений электромагнитного поля). Именно и только в таком качестве имеет смысл оценивать предлагаемую модель.

## 2. Эволюция игрушечной квантовой частицы

(а) В модели используется объект, традиционный для мягкого моделирования, - клеточный автомат. В одномерном случае КА представляет собой линейку из одинаковых ячеек. Число состояний, которые могут принимать ячейки, предполагается конечным, а правило изменения состояний *локально*, то есть учитывает состояния небольшого числа соседей каждой ячейки.

Рассмотрим одномерный КА, ячейки которого могут принимать одно из семи значений:  $f_i \in \{ '0'; '1'; 'e'; '→'; '←'; '<'; '>' \}$ . Эти обозначения имеют следующий смысл:

- '0' - в ячейке нет локализованной частицы;
- '1' - в ячейке *может находиться* локализованная частица;
- 'e' - частица «размазывается» по пространству (expand);
- '→' - запрос на локализацию вправо (right collapse);
- '←' - запрос на локализацию влево (left collapse);
- '>' - отказ вправо (right refuse);
- '<' - отказ влево (left refuse).

Традиционно (со времен Дж. фон Неймана) обновление состояний всех ячеек в КА происходит синхронно. В нашем КА этот принцип не соблюдается: на каждом элементарном шаге эволюции случайно выбирается пара взаимодействующих ячеек, которые обновляют свои состояния. Эти ячейки не равноправны: одна из них условно называется ведущей, вторая - ведомой. Представляется, что локальная синхронизация ячеек пространства-времени (даже игрушечного) более физически оправдана, чем глобальная синхронизация.

(б) Полное формальное описание правил перехода КА дано в [5], но их *легче* понять и восстановить по приведенным ниже примерам эволюции.

Вначале единственная частица нашей игрушечной Вселенной локализована. Пространство КА выглядит так: ...0001000... *Внешним воздействием* задается переход '1'→'e': ...000e000.

Использование внешнего воздействия, и это важно понимать, означает лишь то, что устройства, излучающие и регистрирующие частицу, суть макроскопические неустойчивые системы, они описываются *внешним образом* по отношению к микроскопической модели.

Значок 'e' означает 'expand' - частица делокализована и начинает расплываться в пространстве (признак 'e' «диффундирует» в обе стороны со средней скоростью  $1/2$  клетки за шаг): ...00eeee000... . В любой точке, куда дошел признак 'e', также *внешним образом* можно задать переход 'e'→'1': ...000eeeeleeeleee000...

Таким образом, в пространстве появляется несколько ячеек - претендентов на очередную локализацию частицы. Физический смысл претендентов - регистрационные экраны, установленные в разных точках пространства. После появления ячеек-претендентов (установки экранов) они начинают обмениваться сигналами запроса на локализацию '→' и '←'. Выглядит это так:

```

00eeleeeeeleee0  ⇒  0ee←1→eee←1→ee0  ⇒  ...  ⇒
00001→→→←←←←10000  ⇒  00001→→<←←←←10000  ⇒  ...  ⇒
00001→<←←←←←10000  ⇒  ...  ⇒  00001<←←←←←10000  ⇒  0000
←←←←←←←←←←10000  ⇒  00000  ←←←←←←←←←←10000  ⇒  ...  ⇒
0000000000 ←←←←10000  ⇒  ...  ⇒  00000000000010000.

```

(в) Необходимо прокомментировать следующее.

1. Если сталкиваются сигналы запроса '→' и '←' от разных претендентов, то один из них с вероятностью  $1/2$  превращается в *противоположно направленный* сигнал отказа, то есть '<' или '>'. Сигнал отказа '<('>)', распространяясь, заменяет встречные сигналы '→'('←') (а также испутившую их ячейку-претендента) на противоположно направленные '←'('→').

2. Если сигнал запроса '→'/'←' при распространении достигает '0', он начинает «откат назад», замещаясь на '0'.

3. Важно, что сигналы '→'/'←' и '<'/'>' распространяются в одну сторону (куда указывает стрелка) со средней скоростью 1 ячейка за шаг, а признак 'e' - в обе стороны со средней скоростью  $1/2$ . Поэтому коллапс частицы происходит всегда, как бы далеко ни распространился признак 'e'.

(г) Из соображений четности очевидно, что в итоге в пространстве *всегда* остается в *точности* одна ячейка - претендент на локализацию. Частица локализована, вообще говоря, в новой точке. Это верно и в том случае, если претендентов было больше двух:

```

0e1eeeeleeeeeleee0  ⇒  0←1→eee←1→ee←1→ee0  ⇒  ...  ⇒
001→→→←←←←1→→←←←1→→00  ⇒  001→→→>←←←←10000  ⇒  ...  ⇒
001→→→→→<←←←←10000  ⇒  001<←←←←←←←←←←10000  ⇒  000
←←←←←←←←←←10000  ⇒  ...  ⇒  ...0001000.

```

Обратите внимание, что сигналы отказа '>'/'<' никогда не сталкиваются между собой, а только с '←'/'→' или '1'. При замене '1' на соответствующий сигнал запроса '←'/'→' сигнал отказа исчезает.

### 3. Связь с теоремой о скрытых параметрах

(а) Напомним суть теоремы о скрытых параметрах в формулировке [2]. Рассматриваются эксперименты по излучению коррелированных пар частиц, например, фотонов в двухкаскадном атомном переходе. Фотоны разлетаются в

разные стороны на некоторое удаление, и происходит их регистрация с одновременным измерением коррелированной величины - поляризации.

Если справедливы реалистичные теории со скрытыми параметрами, должны выполняться определенные неравенства (неравенства Белла) для частот различных парных и одиночных регистраций. Проведенные эксперименты уверенно нарушают эти неравенства, что считается надежным подтверждением *отсутствия* скрытых параметров.

В нашей модели мы имеем не две, а одну частицу, но существа дела это не меняет. В экспериментах по теореме Белла регистрирующие приборы характеризуются двумя настраиваемыми параметрами  $a$  и  $b$ . В конкретных экспериментах это направления осей поляризационных фильтров, стоящих перед фотоэлектронными умножителями.

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

В нашей модели скрытыми параметрами  $\lambda$  являются сигналы ' $\rightarrow$ '/' $\leftarrow$ ' и '<'/'>', а аналогом настраиваемых макроскопических параметров являются ячейки с признаком '1' на 'e'- фоне. Иными словами, само присутствие измерительного прибора или его отсутствие в данной точке является настраиваемым макроскопическим параметром. Но, очевидно, распределение  $\rho(\rightarrow, \leftarrow, >, <, x, t)$  существенно зависит от числа и расположения установленных экранов.

**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.

#### 4. Обсуждение

(а) Важно понять *логические* истоки указанного допущения, сделанного Беллом и авторами [2]. Все дело в том, что они предполагают, что *вся* информация о частицах и коррелированной величине (поляризации) *локализована* в частицах.

Мы же под частицей понимаем именно *факт ее регистрации прибором*. В терминах нашей модели регистрацией является возникновение конфигурации '010'. Конфигурации вида 'e1e', 'e10', '01e', ' $\leftarrow 1 \rightarrow$ ', ' $\leftarrow 1e$ ', 'e1 $\rightarrow$ ', '01 $\rightarrow$ ', ' $\leftarrow 10$ ' *не есть* событие регистрации. То есть появление частицы в точке можно рассматривать как *составное* - появление '0' с двух сторон от '1'.

В дублировании информации - ядро модели. *Неполная* информация о частице может перемещаться, не будучи локализованной. Можно допустить, что в природе *в принципе наблюдаемы* только факты получения дублированной информации, именно поэтому параметры являются в полном смысле скрытыми, ненаблюдаемыми.

(б) В связи с этим интересно обсудить еще один момент. Если мы говорим об излучении и поглощении фотона, то, выходит, скорость распространения сигналов ' $\rightarrow$ '/' $\leftarrow$ ' и '<'/'>' *больше скорости света*. Это абсолютно нормально и 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, то есть, в нашей терминологии, той информации, которая была продублирована.

(в) Читатель мог убедиться, что начать разговор о скрытых параметрах, не подпадающих под теорему Белла, можно было только с очень простой модели,

отражающей принципиальную сторону дела. Ясно, что предложенная схема элементарно описывается в терминах клеточных автоматов, но описать ее на «непрерывном языке» гораздо сложнее. Представляется, что язык клеточных автоматов в этой ситуации не просто один из возможных языков описания, а самый адекватный язык.

### Библиографический список

1. Bell J.S. Physics 1. 1965. 195.
2. John F. Clauser, Michael A. Horne, Abner Shimony, Richard A. Holt. Proposed experiment to test local hidden-variable theories // Physical Review Letters. 1969. Vol. 23, № 15. P. 880-884.
3. Feynman R. Modeling of physics on computers // International Journal of Theoretical Physics. 1982. Vol. 21, № 6/7.
4. Джеймс Клерк Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1954.
5. Куракин П.В., Малинецкий Г.Г. Клеточные автоматы с псевдоквантовой эволюцией. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 70. 2001.

*Институт прикладной  
математики им. М.В. Келдыша РАН*

*Поступила в редакцию 11.03.03*

### CELLULAR AUTOMATON «TOY QUANTUM MECHANICS»

*P.V. Kurakin, G.G. Malinetsky*

An original model of toy quantum mechanics is proposed that uses hidden variables but does not violate well-known Bell theorem.



*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@keldysh.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