

**Джон С. Белл**

## **Индетерминизм и нелокальность**

[Глава 7-я книги: A.Driessen & A.Suarez: *Mathematical Undecidability, Quantum Nonlocality and the Question of the Existence of God*]

Перевод М.Х. Шульмана

-----

## **Indeterminism and Nonlocality**

**John S. Bell**

-----

Ниже приведен текст выступления Джона Белла 22 января 1990 года на коллоквиуме в ЦЕРН, организованном по инициативе Центра Квантовой Философии (Center for Quantum Philosophy), Женева. Текст выступления, записанного на видеопленку, был затем литературно обработан, однако сохранил непосредственность и оригинальность авторской манеры... В дальнейшем профессору Беллу не удалось самому отредактировать текст. С другой стороны, издатели не уверены, что это существенно повлияло бы на улучшение публикации. Вместо этого мы просим наших читателей не обращать внимания на отдельные недостатки, которые иногда связаны просто с невысоким качеством записи звука. Мы хотели бы поблагодарить R.W. Nowak за замечательно проделанную работу по восстановлению текста с видеозаписи.

## **Вводные замечания**

Антуан Суарес (A. Suarez),  
Центр Квантовой Философии, Женева

Об индетерминизме все мы много слышали еще студентами. С другой стороны, еще имеются бестселлеры знаменитых физиков, не содержащие упоминания о нелокальности. Каждый, читающий точную книгу Джона Белла "*Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*<sup>1</sup> (*Произносимое и умалчиваемое в квантовой механике*)", хотел бы спросить автора: "Для когерентной физической теории нужны и индетерминизм, и нелокальность, или только что-то одно из них – и в этом случае что именно? – или любое из них." Мы очень благодарны профессору Беллу за его согласие обсудить с нами эту проблему. Выступление будет записано, так что все заинтересованные в этом смогут получить копию ленты в нашем Центре. Пожалуйста, профессор Белл.

---

<sup>1</sup> J.S. Bell: *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge(1987)

## Выступление

### 1. Введение

Предположим, что это – металлическая сетка, сделанная из некоторого очень прочного металла, и я стреляю в нее пулей. Иногда пуля попадет в металл и будет остановлена, а иногда она пролетит через отверстие в сетке. Теперь представим себе все это в микроскопическом варианте, так что я не смогу глазами (или даже с помощью прибора) разглядеть, что же случилось, но мы по-прежнему имеем некоторые части сетки прозрачными, а некоторые - непрозрачными. И что же произойдет, когда я буду стрелять маленькими пулями? Иногда они будут пролетать насквозь, а иногда - нет, так что в этой ситуации возникает некоторая **непредсказуемость**<sup>2</sup>. Мой эксперимент иногда даст результат 'прошла', а иногда другой результат: 'остановлена'. Классический физик в такой ситуации будет понимать дело таким образом, что эта непредсказуемость связана с **недостатком контроля**. Что когда я думаю, что я каждый раз осуществляю один и тот же эксперимент, то это не так, потому что существуют незначительные обстоятельства, которые я не воспроизвожу в точности одинаковыми от опыта к опыту. Так что для классического физика или, скажем, физика 19-го столетия непредсказуемость попросту означает недостаток контроля.

Таким образом, непредсказуемость не была синонимом **индетерминизма**. Для нашего классического физика непредсказуемость была отражением человеческого несовершенства, но природа могла выглядеть абсолютно детерминистичной.

Теперь рассмотрим ситуацию, немного похожую эту. Представим себе фотоны, разлетающиеся от этой лампы, прилетающие сюда и отраженные в сторону доски. Если я помещу некоторый поглощающий материал, то не все фотоны пройдут. А если вы делаете эксперименты с одиночными фотонами, то иногда обнаружите, что фотон 'прошел', иногда – 'остановлен'. Возникает непредсказуемость в том, что именно произойдет. Классический физик сказал бы: 'Ага, мы не получаем каждый раз один и тот же результат потому, что мы не все знаем, т.е. мы не все контролируем. В этом эксперименте мы имеем дело с потерей контроля'.

Но отцы-основатели квантовой механики так не говорили, они сказали, что мы здесь столкнулись с **индетерминизмом**. Сейчас, когда я читаю исторические материалы, меня всегда забавляет, что отцы-основатели могли так доверять этому заключению. До этого времени традиционным в физике было, столкнувшись с непредсказуемостью, объяснять это отсутствием полного контроля. И для меня естественным предположением было бы, что ситуация с фотонами подобна той ситуации, о которой я рассказывал здесь.

Это же было естественным представлением о фотоне и для Эйнштейна, который сказал: *'Бог не играет в кости'*. Он всегда верил в то, что природа законопослушна, и если мы не можем контролировать ее, то это просто наше

---

<sup>2</sup> Слова, написанные профессором Беллом на доске, выделены жирным шрифтом.

несовершенство. И, таким образом, он полагал, что квантовомеханическое описание является **неполным**. Это должно было быть дополнено идеей о существовании **скрытых переменных**, которых мы пока не можем назвать, но которые должны быть введены в теорию. И когда эти скрытые параметры будут найдены, хотя бы концептуально, мы снова увидим совершенство и законопослушность природы, снова вернемся к **детерминизму**.

Теперь заменим поглощающий материал на поляризующий материал (см. рис. 1). Фотоны, проходящие через поляризующий материал, обладают тем свойством, что они не могут пройти через второй экземпляр этого же материала, если тот ориентирован под прямым углом к первому. Вот если он ориентирован параллельно первому, то они смогут пройти также и через него. Иначе говоря, таково свойство фотонов, они обладают поляризацией, которую можно определить с помощью таких образцов материала, и это связано с тем, о чем я буду говорить далее.

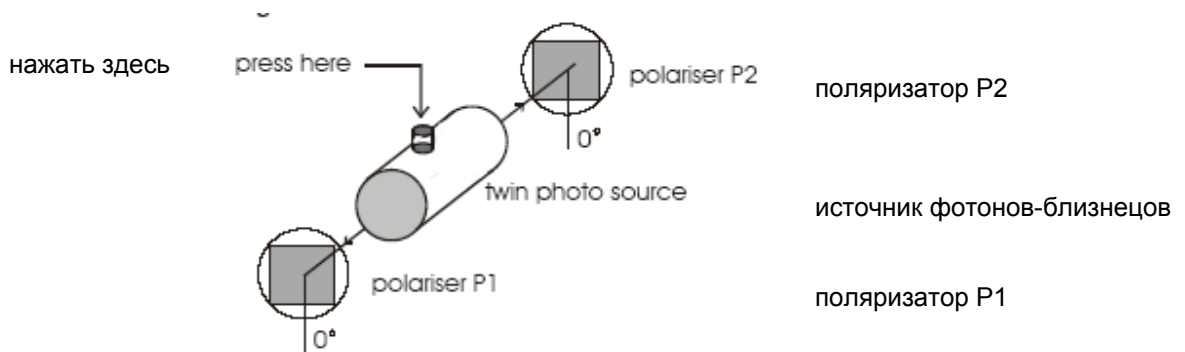


Рисунок 1. Экспериментальная установка для ЭПР-эксперимента с двумя фотонами. Поляризаторы параллельны и ориентированы под углом  $0^\circ$  к вертикали.

Итак, сначала это просто была рабочая гипотеза Эйнштейна и нескольких других упрямых классических физиков 19-го столетия. Но 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.

**локальность → детерминизм**

## 2. Мысленный ЭПР-эксперимент

Теперь перейдем к ситуации, которой он<sup>3</sup>, а позже – в виде более простого примера – Дэвид Бом уделили столько внимания. Эта ситуация такова: вы можете

<sup>3</sup> A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, Can quantum-mechanical description of physical reality can be considered complete?, Phys. Rev. **47**, 777-780 (1935).

изготовить некоторым способом, который я не буду подробно обсуждать, фотоны - близнецы. У вас есть источник фотонов, который, если нажать на кнопку, испускает один фотон в направлении этой диаграммы, а другой – в противоположном направлении (см. рис. 1). И вы можете видеть, что эти фотоны проходят или не проходят через эти поляризаторы – детекторы. И этот источник фотонов – близнецов устроен так, что если один фотон проходит здесь, то второй фотон проходит там, а если первый фотон не проходит здесь, то второй фотон не проходит там. Это характерное свойство данного источника. Квантовая механика говорит нам, что такие источники существуют, они были созданы экспериментально. Неважно, как ориентированы фотоны, важно, что они ориентированы вдоль одного и того же направления.

Так вот, это очень мощный аргумент против идеи, что прохождение фотона через поляризатор является чисто случайным фактом. Если бы результаты зависели от “бросания костей” здесь и от “бросания костей” там, то каким образом эти результаты могли бы всегда совпадать здесь и там?

Эта ситуация очень похожа на ту, которая очень занимает биологов, когда речь идет об истинных близнецах - людях. Я знаю, что все дети рождаются с голубыми глазами, но у некоторых из них глаза потом становятся карими, и вы можете подумать, что это – дело случая. Можно даже заключить пари, какими окажутся глаза. Но это вовсе не дело случая. Мы знаем об этом благодаря феномену истинных близнецов. Если даже их разделить до того, как их глаза приобретут окончательный цвет, то они либо у обоих будут карими, либо у обоих - голубыми. Но мы не думаем: “Ох, какая загадочная корреляция на расстоянии!”, мы в этом случае говорим о законах генетики.

Аналогичным образом, разумный человек может сделать разумное предположение, что мы имеем дело с некоторым фактором генетического типа. Что эти фотоны незаметно для нас несут некие малые пакеты информации, одинаковые для каждого из них, которые при встрече с одними и теми же обстоятельствами диктуют им одинаковое поведение. Вот в этом и состоит аргумент Эйнштейна-Подольского-Розена (EPR): из того, что действия на расстоянии не существует, они выводят детерминизм. Если вы не желаете принять гипотезу детерминизма, то, я думаю, вы должны согласиться с идеей корреляции на расстоянии без какого-либо объяснения. Что касается Эйнштейна, то он возражал против идеи действия на расстоянии.

### **3. Неравенство Белла**

Итак, для Эйнштейна квантовая механика оказывается неполной. Формализм, которым мы пользуемся, не является целостным, он ничего не говорит о ‘генах’. Это как если бы биология не содержала упоминания о генах, и соответствующие факты считались бы в ней делом случая, и совпадение некоторых фактов, относящихся к истинным близнецам, считалась бы загадкой. Он, далее, считал, что должны существовать переменные, о которых мы не знаем, не можем их контролировать, но которые аналогичны генам. И они объясняют эти корреляции на расстоянии без апелляции к действию на расстоянии. Потому что причинность обусловлена

наличием у этих объектов общего источника. В действительности Эйнштейн сказал: *“Бог не играет в кости”*, но этот аргумент был скорее не самостоятельным, а выводом из предположения об отсутствии действия на расстоянии. В более поздние годы Эйнштейна гораздо больше заботило то, что квантовая механика не была свободна в явной форме от действия на расстоянии, чем детерминизм как таковой.

Сейчас кажется чудовищной иронией, что этот самый аргумент, который я считаю очень мощным, и который сегодняшним людям следовало бы принять, вернулся к Эйнштейну бумерангом. И стал столь же мощным аргументом против его собственной позиции. Теперь ситуация выглядит следующим образом:

Мы осуществили этот эксперимент, я описал его результаты при параллельно ориентированных анализаторах (см. рис. 1). Но вы, конечно, можете осуществить его с непараллельными анализаторами. Начнем со случая параллельности, а затем предположим, что мы повернули один поляризатор на тридцать градусов.

Теперь у нас нет больше этого полного совпадения результатов. Иногда первый фотон пройдет здесь, а его близнец не пройдет там, и наоборот. И квантовая механика дает формулу для количества несовпадений, которое возникает при таком повороте устройства. Мы могли бы повернуть не этот, а другой поляризатор, и получили бы такое же количество несовпадений. Мы также можем повернуть оба поляризатора, и тогда получим иное количество несовпадений. Теперь рассмотрим простое соотношение между этими тремя ситуациями, которые я описал, а именно: поворот одного, поворот другого и поворот обоих поляризаторов. Вот что мы получим.

Пусть  $N$  есть число случаев, когда мы имеем несовпадение результатов между двумя сторонами установки, т.е. “да” и “нет”, или “нет” и “да”. Когда у обоих поляризаторов отклонение было нулевым, несовпадений не было, всегда было “да” и “да”, или “нет” и “нет”. Но никогда “да” и “нет”, или “нет” и “да”.

$$N(0^\circ, 0^\circ) = 0 \tag{1}$$

Если я теперь рассматриваю случай, когда повернуты оба анализатора, один на минус тридцать градусов, а другой на плюс тридцать градусов, то легко видеть, что, в соответствии с генетической гипотезой, это число должно быть меньше или равно сумме чисел несовпадений для случаев, когда повернут только один или повернут только второй поляризатор.

$$N(+30^\circ, -30^\circ) \leq N(+30^\circ, 0^\circ) + N(0^\circ, -30^\circ) \tag{2}$$

Это действительно легко показать, поскольку регулирование этого устройства должно быть таким, что при этом некоторые “да” заменяются на “нет”, а некоторые “нет” заменяются на “да”, когда я поворачиваю устройство. То же происходит, когда я поворачиваю другое устройство. Т.е. в этом случае я всегда увеличиваю величину несовпадений, тогда как вначале мы имели полное совпадение, только “да” и “да”, или “нет” и “нет”.

Таким образом, каждое изменение здесь приводит к увеличению несовпадений, и каждое изменение там тоже приводит к увеличению несовпадений. Но если мы производим изменения сразу с двух сторон, то некоторые вновь возникающие несовпадения из-за изменений с одной стороны могут оказаться скомпенсированными в результате изменений, произведенных на другой стороне. Поэтому количество несовпадений после изменений с обеих сторон будет меньше или равно сумме чисел несовпадений при одиночных поворота.

Теперь, если вы подсчитаете все это с помощью квантовой механики, то получите вот что. Я не помню точно, кажется, при повороте с обеих сторон мы получим  $3/8$  (это доля от полного числа событий), а здесь и там – по  $2/8$ . Нет, это неверно. Должно быть  $1/8$  и  $1/8$ .

$$N(+30^\circ, -30^\circ) = 3/8$$

$$N(+30^\circ, 0^\circ) = 1/8$$

$$N(0^\circ, -30^\circ) = 1/8$$

Подставив в (2), получаем

$$3/8 \leq 1/8 + 1/8 !!!$$

Получается как раз так, что и предсказания квантовой механики, и результаты реально выполненных экспериментов не удовлетворяют этому неравенству. Это грубый медицинский факт. Генетическая гипотеза, которая вполне годилась для случая параллельных анализаторов, просто не работает для непараллельных устройств. Вы не можете двигаться вперед на основе генетической гипотезы, и, следовательно, довод Эйнштейна неверен. Принцип отсутствия действия на расстоянии приводит вас к детерминизму в случае параллельных анализаторов, но детерминизм – при непараллельных анализаторах – приводит вас назад, к наличию действия на расстоянии:

**нет действия на расстоянии (параллельные поляризаторы) → детерминизм**

**детерминизм (непараллельные анализаторы) → есть действие на расстоянии**

#### **4. Действие на расстоянии**

Теперь, отвечая на вопрос, поставленный Вами в начале, я не могу сказать, что действие на расстояние необходимо для физики. Но я могу сказать, что вы не сможете уйти дальше с идеей отсутствия действия на расстоянии. Вы не можете отделить то, что происходит в одном месте, от того, что происходит в другом. Эти вещи должны как-то описываться и объясняться совместно. В общем, это просто реальный факт; программа Эйнштейна не работает, это очень плохо для Эйнштейна, но мы-то должны беспокоиться об этом? Что из этого следует?

Имеются три ответа на вопрос: “Что из этого следует?” Первый состоит в том, что сама идея действия на расстоянии является тягостной для физиков. Если бы я

позволил себе говорить об этом в течение часа, я забросал бы вас цитатами из Ньютона, Эйнштейна, Бора и других великих людей, говоря вам, как неприемлема идея о том, что делая что-то здесь, можно что-то изменить в удаленном отсюда месте. Я думаю, что отцы-основатели квантовой механики не так уж и нуждались в аргументах Эйнштейна о нежелательности действия на расстоянии, так как они смотрели дальше. Сама идея, что надо выбирать между детерминизмом и действием на расстоянии, была столь тягостной для них, что они смотрели вдаль.

Ну, что ж, это традиция, а нам надо иногда учиться у жизни новым традициям. Быть может, нам надо учиться не столько принимать действие на расстоянии, сколько соглашаться с неадекватностью идеи об отсутствии действия на расстоянии.

Есть еще две профессиональные причины для недовольства этой ситуацией. Первая – это теория относительности. Согласно ей, понятие одновременности является относительным. Так что события, одновременные для одного наблюдателя, не являются одновременными для другого. Таким образом, для очень больших расстояний лишено смысла говорить, что одно событие произошло раньше или позже другого. И когда мы допускаем, что результат в одной из этих экспериментальных установок зависит от того, что экспериментатор делает с другой, мы получаем головоломку, потому что мы не хотим, чтобы то, что делается здесь, влияло на то, что происходит там, еще раньше, чем это было сделано здесь. Но если я говорю, что “это” влияет на “то”, я могу найти некоторого наблюдателя, для которого “это” происходит после “того”. Т.е., если я пользуюсь традиционной концепцией причинности, в которой следствие может быть нелокальным в смысле мгновенного распространения на большие расстояния, то в некоторой системе отсчета следствие может предшествовать причине. Таким образом, нам следует быть как-то более гибкими. Я должен найти какой-то выход из этой ситуации, который позволял бы чему-то как-то распространяться из одного места в другое, очень быстро, но без конфликта со специальной теорией относительности. Этого пока не сделано. 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.

Вторая причина – это отсутствие передачи информации, отсутствие сигналов. Является фактом, что я не могу как-либо использовать эту нелокальную связь, чтобы послать сигнал. Когда вы смотрите, что предсказывает квантовая механика, то оказывается, что она предсказывает, сколько бы вы ни смотрели по отдельности с каждой стороны установки, на которой проводится эксперимент, просто отсутствие информации о том, что происходит с другой стороны. Ничего о том, что именно этот второй ассистент делает со своим оборудованием; вы не узнаете ничего стоящего о том, что происходит на его стороне. В качестве аналогии могу привести такую ситуацию: предположим, мы подбрасывали монеты, я здесь, а один из вас – где-то еще. И предположим, что я обладаю властью заставить вашу монету перевернуться за очень короткое время до того, как она упадет на стол. Теперь вы смотрите на ваши монеты и видите серию орел-решка-орел-решка. Но вы не знаете, когда я использовал свою власть поворачивать монету, потому что вы не знали, должна ли она была упасть орлом или решкой. Итак, мы имеем забавную ситуацию, когда для объяснения корреляций между моими и вашими результатами мы должны привлечь

какую-то тайную власть. Но это нечто, что я абсолютно не способен использовать для передачи сообщения. Я тут получил демонстрацию этого. Это – компьютерное моделирование такого эксперимента, где люди бросают монеты, и выпадают орлы и решки. И когда монета падает орлом вверх, печаталась буква 'Н', а когда выпадала решкой вверх, то печатался пробел, как вы можете видеть со своих мест. Была осуществлена большая серия “бросков” с орлом и решки (см. рис. 2). Теперь в некоторой точке я употребил свою власть, свою дальнедействующую власть поворачивать монету орлом вместо решки. Результат показан на рис. 3. Итак, кое-где я что-то сделал со случайным кодом. Я заменил орлы решками, но вы абсолютно не в состоянии увидеть это здесь. Это сообщение, как бы вы ни пытались, не более информативно, чем исходное. И только если вы обладаете обеими копиями и можете сравнить их, то сможете что-то увидеть (рис. 4).

Эта забавная ситуация стала источником вдохновения для одной музыкальной композиции. Она получила название `Блюз теоремы Белла'. Я не буду петь ее, я зачитаю слова:

*Doctor Bell say we're connected,  
He called me on the phone,  
But if we're really together baby,  
How can I feel so all alone?*

*Доктор Белл говорит, что мы связаны,  
Он позвонил мне по телефону  
Но если мы и правда вместе, малыш,  
Как я могу чувствовать себя совсем одинокой?*

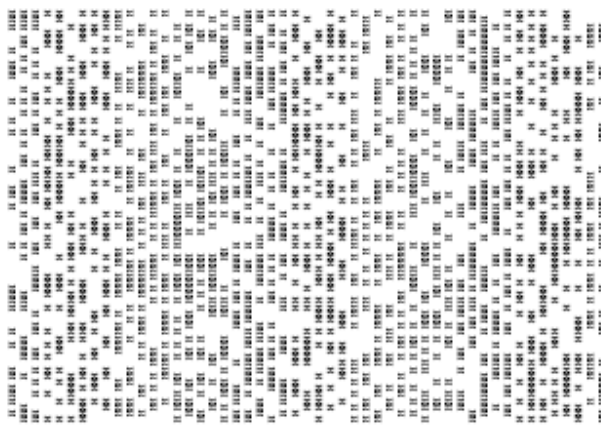


Рис. 2. Результат компьютерного моделирования случайных серий с выпадением орлов ('Н') и решек (пробел)



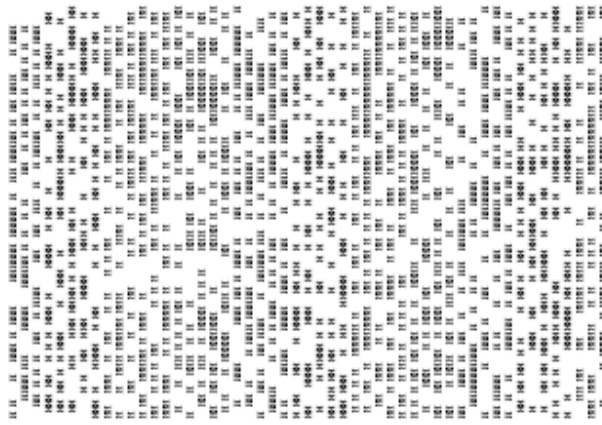


Рис. 3. Инvertированное изображение рисунка 2: орлы (пробел), решки ('Н'). В некоторых местах случайный код изменен.

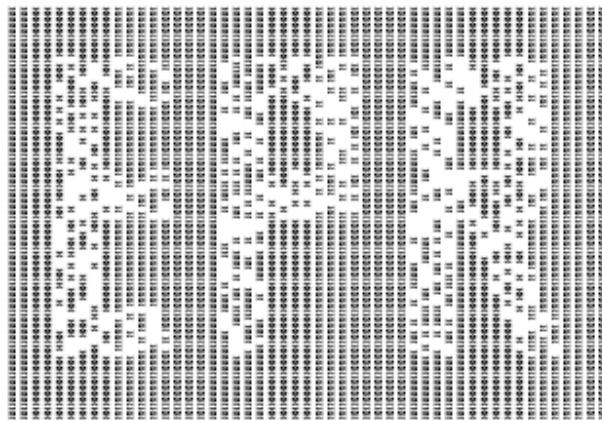


Рис. 4. Наложение изображений рис. 2 и 3 (по В. Julesz)

## 5. Заключение

В этом и заключается дилемма. Анализируя эту ситуацию, мы пришли к тому, что пространственные разделенные вещи как-то связаны, или, по меньшей мере, не являются не связанными. Но при этом мы не чувствуем, что они связаны. Резюмируя эту ситуацию, я думаю, мы не можем сказать: 'Ох-ох, природа не такова'. Я думаю, вы должны найти такую картину, в которой полные корреляции являются естественными, но без привлечения детерминизма, потому что это приводит вас назад к нелокальности. Как говорит наш индивидуальный опыт, наша независимость от остального мира также является естественной вещью. Так что эти связи должны быть очень тонкими, и я сказал вам все, что знаю об этом. Благодарю.

## Дискуссия

### Примечание:

Ниже приведена 60-минутная запись дискуссии. Ответы профессора Белла напечатана обычным шрифтом, выступления всех прочих участников дискуссии – курсивом. Каждый фрагмент начинается с выступления участника дискуссии, высказывания других участников заключены в скобки, '( .... )'. Соглашение о шрифте соблюдается и внутри скобок. Неразборчивые высказывания заключены в кавычки '.....', обычно это несколько слов. Фрагменты пронумерованы вплоть до 113. Мы приводим только те фрагменты, которые, с нашей точки зрения, важны для нашей книги.

*10....., нас учили, что всегда найдутся утверждения арифметики, которые окажутся неразрешимыми с формальной математической точки зрения. Нелокальность заставляет предположить, что имеются также вопросы, на которые формально можно ответить с помощью математики, но в действительности ответа получить нельзя, поскольку информация приходит из столь отдаленных областей, что мы не можем ее использовать. Что Вы думаете? Правильно ли так думать?*

11. Я не знаю, мне кажется, Ваш тезис сформулирован очень кратко, так что я не берусь судить ... правильно это, или нет. Но сам я не думаю, что в этой дискуссии нужно употреблять слова 'теорема Геделя'. Я не вижу здесь связи, если не считать того, что обе темы достаточно сложны для нас. Но, я думаю, Вам понятно, что в случае теоремы Геделя мы имеем некоторую перманентную границу возможностей для систематического вывода. А 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 ..., загадка 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. А вот вопросы, возникающие в соответствии с теоремой Геделя, вряд ли будут решены.

*12. Кажется, из того, что Вы здесь показали, становится привлекательной гипотеза изолированной системы. Ничто не является полностью изолированным от всей остальной Вселенной. В принципе я знаю, что в классической физике вы*

*можете думать, что внешние влияния вы можете сделать сколь угодно малыми. Остается ли еще такая ситуация в силе?*

13. Ну, концептуально вы можете сделать их сколь угодно малыми, но, конечно, мы не можем заявить, например, что Юпитера нет вовсе. Пока он существует, он будет влиять на орбиту Земли, и даже чуть-чуть на то, как падает этот кусок мела. Мел падает в соответствии с предсказанием Галилея лишь в первом приближении. А в некотором приближении он уже будет чувствовать гравитационное поле Юпитера, и созвездия Рака, и Бог знает чье еще, я не могу все это отключить.

*14. Но как далеко можем мы теперь пытаться распространять описание чего-то без учета всей Вселенной?*

15. Ну, во-первых, строго говоря, вы никогда и не могли делать этого. Всегда была упрощенная процедура, в том смысле, что при упрощенном описании вы могли пренебречь большей частью вселенной. Но когда мы анализировали, что говорят наши уравнения, уравнения Ньютона включали действие гравитационного поля Юпитера на этот кусок мела. Таким образом, когда мы анализировали, что говорят наши уравнения, мы должны были вспоминать об этом... Я думаю, речь идет о том же. Если вас интересует лишь ограниченная часть мира, в квантовой механике вы используете так называемую матрицу плотности, которая оперирует с усреднением по всему остальному миру. И тогда матрица плотности содержит выделенное уравнение, не упоминающее остального мира. Еще вы должны согласиться, что если вы хотите такой точности, какую только теория может дать, вы тогда должны ... Вот о чем я подумал: что Эйнштейн дал нам способ исключить всю часть мира за пределами светового конуса. Вы можете сказать, да, остальная часть мира повлияет на нас, но это влияние скажется не раньше, чем свет достигнет нас. Итак, это был способ деления мира на значимые и незначимые части. Ничего большего мы не имеем.

*16. (Это очень важное утверждение.) Извините, значит ли это, что вы утверждаете, что теория относительности и квантовая механика не совместимы?*

17. Нет, нет, я не могу так сказать, потому что я думаю, что кто-либо найдет способ показать, что они совместимы. Но я пока этого не вижу. Мне очень трудно рассматривать их совместно, но, я думаю, кому-то это удастся, и все мы увидим, что мое представление было слишком ограничительным. Вот те люди в этом департаменте, которые сейчас работают, они не задаются этим вопросом, потому что теория суперструн сформулирована на языке традиционной квантовой механики, и еще у вас есть принцип суперпозиции, который, возможно, является ключевым для всех этих вещей. Но, может быть, что когда пойдут дальше в этом направлении, то окажется, что это не будет работать традиционным образом, и в определенной точке придется пожертвовать принципом суперпозиции. ... в этом направлении, и случайно наткнутся на статью обо всем таком под названием 'Как коллапсирует волновая функция горячих дыр'. Ха-ха.

18. .. *что скрытые переменные не существуют. ....*

19. Ну, мне неизвестно, что скрытых переменных не существует. Мы только можем сказать, что с помощью скрытых параметров нельзя восстановить локальность. Но еще остается момент, с которого я начал, что классический физик все еще считает одним и тем же повторяющийся эксперимент, который дает разные результаты. На самом деле это не повторяющийся эксперимент. Вы можете говорить о нелокальном эксперименте, о нелокальных скрытых переменных. Я могу себе представить ситуацию, где у нас есть скрытые переменные и мы снова имеем детерминизм, но не предсказуемость. Потому что мы недостаточно умны, чтобы узнать все необходимое с требуемой точностью. Мы должны быть способны признать такой детерминизм, и он должен быть нелокальным. И мы видим, что каким-то образом удаленные вещи связаны, но при этом не существует возможности обмена информацией.

20. *Но если скрытые параметры существуют, то, так или иначе, мы возвращаемся к классической механике ...*

21. А это зависит от того, что вы называете классической механикой. Вы не возвращаетесь к механике Эйнштейна. Там световой конус четко отделяет значимое от незначимого. Но вы могли бы вернуться к классической механике в том смысле, что вы будете иметь некоторые уравнения, скорее интегральные, чем дифференциальные, и эти уравнения расскажут вам, что происходит. Хотя в квантовой механике все в высшей степени неясно, несмотря на наличие теоретического описания подобного типа. В действительности у нас нет такой теории.

22. *Ну, .. принцип свободы действия экспериментатора. (Да.) Это кажется важным для нас. (Правильно.) Тогда теорема Белла справедлива. Можно ли определить этот эксперимент так: в мире, где существует свобода человеческих поступков, существует в этом смысле и действие на расстоянии, либо мы должны принять, что коррелированные события не имеют никакого рационального объяснения.*

23. Я думаю, это так. *(Вы так думаете?)* Нет, я пока не готов окончательно подписаться под этим. *(смех)* Но в определенном смысле я соглашаюсь с тем, что Вы сказали. Я примерно так же представляю это себе.

24. *Думаете ли Вы, что важно сказать, что из теоремы Белла иногда следует свобода воли экспериментатора.*

25. Ну, это не то, что Вы говорили. *(Да, точно)* ... Потому что в Вашем высказывании свобода действий была гипотезой, а теперь вы пытаетесь сделать ее теоремой.

26. .... *Да, я так думаю. Если допустить принцип свободы действий экспериментатора, то теорема Белла верна. И мой вопрос таков, можно ли определить этот результат таким путем. В мире, где существует свобода человеческих поступков, либо существует действие на расстоянии, либо мы*

*должны принять, что коррелированные события не имеют никакого рационального объяснения.*

27. Что значит свобода воли экспериментатора и свобода человеческих поступков?

*28. Ну, свобода воли экспериментатора – это значит, что существует, в том смысле, в котором профессор Белл говорит в своей книге, не абсолютный детерминизм такого типа, что когда я настраиваю установку, то это не предопределено уже при сотворении мира.*

29. Это верно. Это входит в анализ. Когда я поворачиваю один из этих поляризаторов, я предполагаю, что я могу говорить о тех же самых скрытых переменных, что и до того, как я его повернул. Но если бы мой выбор сам по себе был предопределен скрытыми переменными, то аргументация в этой точке рассуждений оказалась бы неверной. Таким образом, я предположил, что есть что-то вне моей области, совершенно свободное, что не диктуется параметрами, переменными в теории. Очевидно, если я отказываюсь от этого, то у меня нет теории. Но лично я не думаю, что это очень важный момент, в том смысле, что вы знаете, если вы имеете генераторы случайных чисел на компьютере, то вы можете на одном компьютере генерировать случайные числа здесь, а на другом – там, причем по разным программам. Строго говоря, их результаты детерминированы. Но для кого-то, кто не знает программы, результат непредсказуем. Так вот, они самоопределены, так что они ничего не должны делать со скрытыми переменными, как фотоны, которые должны либо пройти через поляризаторы, либо нет. Так что я думаю, что это обладает достаточной свободой, я говорю о свободе генераторов случайных чисел. Но это не теорема, потому что когда вы запускаете генератор случайных чисел, он следует своей программе, и, может быть, ваш выбор программы был предопределен скрытыми переменными (смех) вашей экспериментальной установки. Так что вы должны быть очень глубоко проникнуты идеей освобождения воли.

*32. У меня есть вопрос ... Правильно ли будет сказать, что индетерминизм не является необходимым условием когерентной квантовой теории?*

33. Я, пожалуй, соглашусь с этим, да.

*34. Хорошо. Но квантовая теория не несовместима с индетерминизмом. Можно сказать, квантовая теория совместима с индетерминизмом.*

35. Я думаю, что квантовая теория совместима и с детерминизмом, и с индетерминизмом. (И с тем, и с другим?) С обоими.

36. *Зависит от локальности или нелокальности.*

37. Это правильно. Если это детерминистично. Я думаю, мир должен быть нелокальным, является ли он детерминистичным или недетерминистичным. Я думаю, вы обречены на нелокальность. Я не знаю какой-либо концепции локальности, которая работала бы в квантовой механике. Так что, я думаю, вы

обречены на нелокальность. Обречены ли вы на детерминизм или на индетерминизм, это другой вопрос. Я знаю, что если вы не беспокоитесь насчет Лоренц-инвариантности, вы можете пользоваться явными детерминистическими моделями, согласующимися со всеми экспериментами. Но они не Лоренц-инвариантны. Там вы имеете дело с эфиром, и это трудно переварить. Может быть, Лоренц-инвариантность плюс квантовая механика несовместимы с детерминизмом, но я этого не знаю. Это всего лишь возможность.

40. *Поскольку, я имею в виду, я бы хотел думать, может быть, все ухабы протекают из специальной теории относительности, которая, по моему мнению, есть всего лишь часть физики, но не вся физика в целом. Например, если вы говорите, что действие на расстоянии невозможно. Далее, вы упоминаете, что теория относительности приносит ухабы, но они были связаны и с эфиром. Специальная теория относительности упразднила эфир, но что теперь производит действие? Итак, что вы можете получить из одной только теории относительности, где вы теперь имеете квантовое поле, где требуется еще и гравитация, и где еще требуется эту гравитацию проквантовать. Так что я думаю, что для решения этой проблемы, вероятно, следует перейти к общей теории относительности, а не цепляться за специальную. Может быть..., Я не знаю, но, может случиться, что все трудности исчезнут, если мы забудем про специальную теорию относительности.*

41. Что ж, я, конечно, соглашусь с Вами, что мы могли бы думать в терминах общей теории относительности. Я думаю, все трудности действительно могут исчезнуть, но не в одночасье (смех). Имеется много людей, которые пытались соединить общую относительность с квантовой теорией, не апеллируя к скрытым переменным. Это действительно очень трудно.

42. *Но я думал, что большой успех супергравитации ... и суперструн показывает, что в принципе существуют теории, которые являются математически успешными.*

43. Ну, опять-таки, они спекулируют своими обращениями к широкой публике, хочу я сказать. Когда они пишут об этом, вы обнаруживаете, что они объявляют о теории всего, а на самом деле, обладают лишь элементами теории S-матрицы. Так сказать, тела появляются из бесконечности, и далее ничего не говорится до тех пор, пока они снова не уходят в бесконечность (смех). Но вы не апеллируете к бесконечности. А серьезная теория, включающая гравитацию, должна быть не теорией S-матрицы, но полевой теорией, которая рассматривает вещи в конечные моменты времени и в конечных областях пространства. Они же не могут сделать это. Они очень серьезно пытались, но потерпели неудачу. Так что теория струн не в том состоянии, чтобы нам стоило говорить о ней в рамках настоящей дискуссии.

58. *Есть такое слово ... в языке ... которое смущает меня. Когда ... речь идет о слове взаимодействие, действие на расстоянии, или о причине, причинности. Я думаю, в общем случае это предполагает наличие силы или передачу энергии посредством сигнала. Но вы говорите, что сигнала нет, есть информация без передачи энергии. Так ли это?*

59. Нет передачи энергии и даже нет передачи информации. Вот почему я всегда опасаюсь слова действие, и даже отступаю от утверждения, что есть действие на расстоянии, я только говорю, что вы не можете идти дальше без нелокальности. Вы не можете объяснить вещи событиями, происходящими в непосредственной близости от них. Но я аккуратно стараюсь не утверждать, что речь идет о действии на расстоянии.

60. *.. все взаимодействует со всем ... но не взаимодействует ...*

61. Да, скажем это. Скажем, изменим это и скажем, что мы не можем учесть ничего без того, чтобы учитывать все. И затем, я избегал слова “взаимодействия”. Это верно, слово “действие” связывается в нашем сознании со словом “сила”. И никто не хочет, чтобы возникал этот образ, потому что мне не известен какой бы то ни было смысл, который я мог бы в этом контексте связать со словом “сила”.

66. *А видите ли вы проблему уже там, в классической физике, не имеющей ...?*

67. Ну, вы видите проблему в том, что вещи не изолированы. Но в классической физике разграничение определяют световые конусы, такого разграничения в квантовой физике нет. Как только вы допускаете свободные действия, или эффективно свободные действия, в классической теории их последствия согласуются с областью будущего в световом конусе. Эту концепцию мы, кажется, не можем применить к квантовой теории.

90. *Следующий вопрос, другой вопрос, имеющий больше философскую природу. Вопрос разума и сознания ... несколько месяцев назад Уилер, в своем выступлении в Швеции, сказал мне, что он убежден ... фундаментальную роль играл наблюдатель. И Уилер также очень убежденно настаивал, что человек есть центральный элемент теории. В силу факта нелокальности, кажется, что разум, ..., который конструирует наблюдаемый мир. Если разум конструирует наблюдаемый мир, то этот разум не мог бы быть отстранен от разума человека –наблюдателя.*

91. Если два и два будет пять, чему будет равна сумма трех и трех? Я просто не следую ни за Уилером, ни за Вигнером в их тезисе о том, что атомная физика предполагает человеческий разум. Я не вижу ни малейших следов человеческого разума в атомной физике. И здесь я скорее поддерживаю Бора, чем других, хотя много раз я выступал против Бора. Бор очень строго настаивал, что наблюдатель должен рассматриваться только вместе с неодушевленным прибором. Он ... настаивал, что вы не можете отделить атомные процессы от прибора, использованного для усиления этих процессов до нашего масштаба. Но далее он настаивал, что не имеет значения, наблюдает ли кто-то процесс, или нет.

92. *Да, но он говорит, что это неважно, потому что разные наблюдатели всегда будут видеть одно и то же. Эта концепция объективности является ложной. Но я думаю, что он, хм... его мнение было таково, что явление происходит в тот момент, когда я его наблюдаю.*

93. Это не Бор. (*Это не Бор.*) Нет. Это может быть..., и это может быть фон Нейман, и Вигнер, и ... и ... и Уилер, и кто угодно (*но не Бор*), но это не Бор. И я думаю, что Бор был в этом вопросе авторитетом. Существует чрезмерная экстраполяция этой ситуации в физике, к идее, что разум участвует в ней. Сейчас я могу видеть мотивацию для такой экстраполяции, когда вы говорите, что прибор играет существенную роль, вы спрашиваете 'Ладно, а как мы разделяем мир на системы, прибор и все остальное?'. И ясно, что всякое такое разделение – вещь очень подвижная. Так что, когда имеешь дело с каким-либо естественным разграничением, кто-либо скажет: 'Ах! Между материей и разумом!' И так они поступают с так называемой редукцией волнового пакета, которая является элементом обычной квантовой механики. Вместо того, чтобы отнести происходящее к прибору, они говорят, что это надо отнести к разуму. Но это гипотеза, экстраполяция. Это вовсе не является очевидным в физике, и коль скоро мы говорим о физике, все можно завершить рассмотрением происходящего на уровне прибора.