

Нобелевская премия 2022 года по физике и конец механистического материализма

Часть 1: Исторический обзор¹

Салом Игорь,

старший научный сотрудник Института физики

Белградского университета,

Презревица 118, Земун, Сербия

isalom@ipb.ac.rs

Аннотация

Фундаментальные идеи и результаты, отмеченные Нобелевской премией по физике 2022 года, решительным образом меняют общепринятое понимание реальности. Крайне важно, чтобы эти результаты дошли не только до ученых-специалистов, но и до более широкой публики. Целью настоящего обзора является попытка раскрыть упомянутые революционные изменения в привычном взгляде на мир. Этот радикальный сдвиг в конечном итоге был признан Нобелевским комитетом, и мы попытаемся рассказать об этом с минимальным количеством математических деталей (которые можно игнорировать, не теряя сути вывода). Сначала мы рассмотрим знаменитую дискуссии между Эйнштейном и Бором о природе квантовой механики, имевшую место в 20–30-х годах XX века. Кульминацией ее стал так называемый ЭПР-парадокс – главный толчок для всех исследований, которые проводились потом в этой области. Далее попытаемся прояснить знаменитую теорему Белла. Эта теорема вывела спор Эйнштейна и Бора из области философии в область экспериментальной физики. Далее мы рассмотрим экспериментальные работы лауреатов Нобелевской премии по физике 2022 года, которые поставили точку в споре о том, кто был прав. Результаты этих экспериментов заставляют глубоко пересмотреть наше понимание Вселенной.

Ключевые слова: Нобелевская премия по физике 2022, картина мира, реальность, локальность, теорема Белла, тесты Белла, дискуссия Эйнштейна и Бора, ЭПР-парадокс, скрытые переменные.

¹Авторизованный перевод с английского М. Аркадьева.

2022 Nobel Prize in Physics and the End of Mechanistic Materialism

Part 1: Historical Overview

Igor Salom,
Senior Researcher,
Institute of Physics, Belgrade University,
Pregrevica 118, Zemun, Serbia
isalom@ipb.ac.rs

Abstract

The ideas and results that are in the background of the 2022 Nobel Prize in physics had an immense impact on our understanding of reality. Therefore, it is crucial that these implications reach also the general public, not only the scientists in the related fields of quantum mechanics. The purpose of this review is to attempt to elucidate these revolutionary changes in our worldview that were eventually acknowledged also by the Nobel's committee, and to do it with very few references to mathematical details (which could be even ignored without undermining the take-away essence of the text).

We first look into the foundational disputes between Einstein and Bohr about the nature of quantum mechanics, which culminated in the so-called EPR paradox – the main impetus for all the research that would ensue in this context. Next, we try to explain the statement of the famous Bell's theorem – the theorem that relocated the Einstein-Bohr discussions from the realm of philosophy and metaphysics to hard-core physics verifiable by experiments (we also give a brief derivation of the theorem's proof). Then we overview the experimental work of 2022 year's Nobel laureates, which had the final say about who was right in the debate. The outcome of these experiments forced us to profoundly revise our understanding of the universe.

Keywords: Nobel Prize 2022, understanding of the universe, reality, locality, Bell's theorem, Bell's tests, Einstein-Bohr's discussion, EPR paradox, hidden variables.

Библиографическое описание для цитирования:

Салом И. Нобелевская премия 2022 года по физике и конец механистического материализма. Часть 1: Исторический обзор // Идеи и идеалы. – 2024. – Т. 16, № 3, ч. 1. – С. 195–228. – DOI: 10.17212/2075-0862-2024-16.3.1-195-228.

Salom I. 2022 Nobel Prize in Physics and the End of Mechanistic Materialism. Part 1: Historical Overview. *Idei i idealy = Ideas and Ideals*, 2024, vol. 16, iss. 3, pt. 1, pp. 195–228. DOI: 10.17212/2075-0862-2024-16.3.1-195-228.

Введение

Нобелевская премия по физике 2022 года не похожа ни на одну другую. Разумеется, Нобелевские премии всегда чрезвычайно значимы для общества физиков, однако для широкой публики это, как правило, вопрос простого любопытства. Между тем решение Нобелевского комитета 2022 года *касается всех*, независимо от того, кто и как смотрит на профессию физика. Эта премия напоминает, что наступило время радикального переосмысления привычных взглядов на мир.

Решение Нобелевского комитета вызвало появление нескольких брошюрских заголовков в журналах и новостных агентствах во всём мире, даже среди тех, которые не нацелены на научные круги. Например, деловая газета Financial Times опубликовала 11 октября 2022 года статью «Что квантовая физика говорит нам о *реальности*», а на некоммерческом новостном сайте The Wire вышла статья под заголовком «Нобелевская премия по физике 2022 года – проверка вашего умения разбираться в *реальности*». Журнал Scientific American в своем октябрьском номере представил статью «Вселенная действительно (*реально*) не локальна, и лауреаты Нобелевской премии по физике доказали это».

Философское воздействие Нобелевской премии 2022 года было особенно изящно подчеркнуто в заголовке, который в октябре появился в сети The Conversation: «Как философия превратилась в физику – а *реальность* превратилась в информацию». Как мы видим, слово «реальность» повторяется во всех этих названиях. Мало что может иметь большее значение, чем призывы пересмотреть наши фундаментальные представления о реальности, особенно когда эти призывы исходят от Шведской королевской академии наук.

Но в каком смысле достижения лауреатов 2022 года Алена Аспэ, Джона Ф. Клаузера и Антона Цайлингера бросают вызов нашему пониманию реальности? Нобелевский комитет резюмирует, что премия была присуждена «for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science» – «за эксперименты с запутанными фотонами, установившие нарушение неравенств Белла и положившие начало квантовой информатики». Требуются время и некоторые усилия, чтобы развернуть и понять это с виду простое утверждение. Следует начать с достижений некоторых выдающихся людей, которые по понятным причинам не смогли появиться на Нобелевской церемонии 2022 года.

Эйнштейн и Бор: дебаты

Первый акт глубокой философской драмы, которая получила свое научное разрешение в Нобелевской премии 2022 года, начинается в первой половине XX века, в годы между двумя мировыми войнами, когда «новая

физика», названная квантовой механикой, начала принимать свою математически четко определенную, более или менее современную форму. Все физики были согласны, что утверждения новой теории чрезвычайно парадоксальны, но имелись глубокие разногласия по поводу того, в какой мере такое положение дел отражает истинные свойства природы, а в какой – только нынешнее состояние (возможно, крайне неполное) научного знания. С одной стороны выступали отцы-основатели квантовой механики, к которым принадлежали Нильс Бор, Вернер Гейзенберг и Вольфганг Паули. Им возражали упорные критики квантовых идей, среди которых был и Альберт Эйнштейн. Первые настаивали на том, что квантовая механика точно и полно описывает реальность (и если нам это не нравится, то ничего не поделаешь, такова природа), вторые были убеждены, что квантовая физика – это в лучшем случае временная и приближительная модель некоей более обоснованной физики, которую нам еще предстоит открыть.

Новая физика, казалось, игнорировала все прежние основы точных наук. Одним из наиболее очевидных отступлений от привычного научного способа мыслить было внезапное появление случайности на фундаментальном уровне новой теории, что сподвигло Эйнштейна на знаменитый протест: «Бог не играет в кости». Вспомним, что один из главных принципов всей предшествующей физики, включая тогдашнюю новаторскую теорию относительности, заключался в том, что в природе не может быть ничего случайного – всё развивается по строгим математическим законам, которые точно определяют будущее любой физической системы, не оставляя места для разрывов и случайностей.

Для классической физики любая случайность в событиях, которые мы можем наблюдать, должна быть или следствием наших *неточных знаний* нынешнего состояния Вселенной и законов природы, или следствием нашей *технической неспособности* рассчитать будущее на основе этих основных законов. Но *независимая от нашего знания реальность* сама по себе точна и непоколебима. Для гипотетического идеального абстрактного существа (так называемого «демона Лапласа»), обладающего полным знанием физических законов и достаточными вычислительными возможностями, которому при этом известны точные положения и импульсы каждого атома во Вселенной в данный момент времени, всё будущее и прошлое будет полностью известно.

Такая точка зрения по сути никем никогда не оспаривалась в науке до тех пор, пока не появилась новая квантовая теория. В те дни Макс Борн выдвинул свою вероятностную интерпретацию волновой функции (волновая функция была основным математическим объектом новой физики, описывающим все свойства системы), согласно которой мы не могли

сделать ничего большего, как только предсказывать вероятности экспериментальных результатов – и не из-за недостатка наших технологических возможностей, а в принципе. Из квантовой теории следовало, что физические законы не могут полностью определять будущее систем, а дают лишь вероятности возможных событий.

Многим, включая Эйнштейна, уже это казалось возмутительным. Но постепенно становилось ясно, что на карту поставлено гораздо большее, чем детерминизм классической физики. Полученное Гейзенбергом соотношение неопределенностей устанавливало, что некоторые свойства вроде положения и импульса как бы взаимно «враждуют»², иными словами – не могут быть известны одновременно с произвольной³ точностью. Это соотношение оказалось неизбежно связанным с индетерминизмом, обеспечивая математическое понимание того, почему мы не можем снизить неопределенности нашего знания физических систем и восстановить детерминизм. Становилось ясно, что благодаря соотношению неопределенностей невозможно «отследить» все детали данного состояния системы, а значит, невозможно точно предсказать ее будущее состояние – остается лишь делать прогнозы статистического типа. По крайней мере, такова была интуиция, основанная на нашем классическом понимании систем и их свойств, что, конечно, подразумевало, что эти свойства хорошо определены сами по себе, несмотря на то что наши знания о них могут быть весьма расплывчатыми. Однако именно здесь позиции двух лагерей начали расходиться. На самом деле оставалось неясным, как интерпретировать соотношение неопределенностей.

Одно дело – согласиться с тем, что мы технически не в состоянии определить некоторые физические величины с произвольной точностью и даже с тем, что законы физики так «сговорились», что это оказывается невозможным в принципе, независимо от наших технологических возможностей и экспериментальных навыков. Казалось разумным, что сам акт измерения, который должен включать в себя некоторое взаимодействие с измеряемым объектом, неизбежно возмущает этот объект непредсказуемым образом, что и приводит к неопределенности. Эйнштейн был вполне готов принять такую возможность, даже если на практике она исключала всякую перспективу определения точных свойств систем и навсегда ограничивала наши экспериментальные предсказания простым вычислением вероятностей. Мы несовершенны, и поэтому не исключено, что наши возможности, в том числе и по сбору точных данных о Вселенной, строго ли-

² Выражение А.М. Семихатова (здесь и далее примечание переводчика).

³ Произвольной, т. е. сколь угодно высокой, в пределе бесконечной точностью. Подразумевается в том числе особая роль математического анализа (Calculus) в классической механике.

митированы. В этом случае именно техническое несовершенство и является проблемой. Вселенная (и сами системы), конечно, «знает» свои свойства (в том смысле, что реально обладает ими), и стоящая за этим объективная реальность должна быть четко определенной, твердо реальной. Соотношение неопределенностей с этой точки зрения было только техническим или эпистемологическим ограничением и не имело ничего общего с истинной онтологией, которую еще предстоит описать более полной теорией, чем квантовая механика. Поэтому Эйнштейн и заявлял, что «Бог не играет в кости со Вселенной». Гейзенберг, казалось, первоначально разделял этот взгляд на свои соотношения, как можно заключить из его анализа того, что сегодня известно как «микроскоп Гейзенберга» [33]. Однако он вскоре изменил свою позицию под влиянием Бора [31].

Совсем другое дело – предположить, что соотношение неопределенностей не просто говорит о нашей технической неспособности выявить истинные свойства природы, а отражает *неопределенность самих этих свойств* как таковых. При таком взгляде проблема оказывается не в том, что если импульс частицы точно известен и определен, то мы не можем *узнать* положение этой частицы, а в том, что положение этой частицы в некотором смысле больше *не существует*, т. е. что оно само по себе не является четко определенным свойством. (Следуя математическому формализму, мы могли бы сказать, что это свойство становится принципиально и навсегда размытым в так называемой суперпозиции различных возможностей.) Другими словами, ни Вселенная, ни сама частица на самом деле «не знают», где она находится (то есть частица не обладает свойством «где-то определенно находиться»). И такая точка зрения постепенно становилась позицией лагеря Бора. Бор, в частности, рассматривал эту проблему сквозь призму принципа дополнительности, который, судя по всему, является предшественником современного понятия контекстуальности в квантовой физике.

Знание *одного* из двух «дополнительных» («несовместимых» в контексте соотношения неопределенностей) свойств автоматически делает неопределенным *другое*. Точное измерение импульса не просто делает положение частицы неизвестным или непредсказуемым (например, вследствие механического возмущения частицы) – оно делает его полностью бессмысленным и неопределимым. По мнению Бора, сами свойства неотъемлемы от экспериментального контекста, который их выявляет: установка, необходимая для измерения импульса, кардинально отличается от установки, необходимой для определения положения. То есть эти два свойства никогда и нигде нельзя наблюдать или измерять одновременно. Неверно даже предполагать, что положение существует «на самом деле» в контексте, в котором (точно) измеряется импульс, и наоборот. Но такой взгляд неизбежно вел дальше

в кроличью нору. Он отменял наши основополагающие представления о реальности. «В традиционном представлении предполагается, что существует реальность в пространстве-времени и что эта реальность – некая данность, все аспекты которой можно рассмотреть или сформулировать в любой момент. Бор был первым, кто указал, что квантовая механика ставит под сомнение эту традиционную точку зрения» [18, р. 50].

Неизбежен вопрос: если положение или импульс (а это справедливо и для любого другого свойства) не всегда четко определены, то *когда же они становятся четко определенными?* Попытки ответить на этот вопрос в конечном итоге привели к тому, что сейчас называется «проблемой измерения» в квантовой механике. А именно казалось, что свойства становятся определенными и, следовательно, полностью (т. е. в традиционном, классическом смысле) реальными только *после* их измерения, т. е. наблюдения. Согласно квантовому формализму вероятности различных возможных результатов сводятся к одному действительно реализованному результату только при измерении. Простая потенциальность превращается в актуальность. Эту идею часто обобщали как «измерение вызывает коллапс волновой функции».

И всё же что именно можно считать измерением? Бор полагал, что для получения результата в данном экспериментальном контексте достаточно указать на взаимодействие измеряемой системы с макроскопическим измерительным прибором, который должен описываться на языке классической физики [8]. Однако здесь возникает ключевой вопрос: где именно пролегает *граница* между квантовой системой и классическим измерительным прибором? Эта грань между квантовым миром и классическим прибором (который обладает важнейшей «способностью» делать свойства квантовой системы наблюдаемыми, определенными и тем самым действительно реальными через измерение) оказывается сама по себе текучей и расплывчатой. В самом деле, что мешает нам теоретически рассматривать измерительный прибор как еще одну (хотя и более крупную, сложную) квантовую систему, которая тоже подчиняется принципам квантовой механики? Ничто не мешает, это законная теоретическая операция. Прибор (например, электронный микроскоп) состоит из тех же элементарных частиц, что и любой атом вещества, и на фундаментальном уровне подчиняется тем же универсальным законам природы, как бы это ни выглядело на уровне макроскопического наблюдателя. А если так, то что делает свойства самого прибора (с измеряемой системой или без нее) вполне *определенными*, т. е. когда именно и при каких условиях в этом случае реальность становится действительно *реальной?*

Подобная цепочка мыслей побудила Юджина Вигнера предположить, что именно сознание наблюдателя (как предположительно единственная

сущность, не описываемая квантовыми законами) завершает процесс измерения и наделяет физические системы полной реальностью. Нет нужды говорить, что такая точка зрения (если рассматривать ее, по Вигнеру, как утверждение, что сознание вызывает объективный, а не всего лишь субъективный коллапс волновой функции) спровоцировала бы ряд других неразрешимых и нелепых вопросов (например, может ли кошка, мышь, амeba или один нейрон вызвать коллапс?). По сей день нет единого мнения о том, что является удовлетворительным ответом на вопрос, *когда* реальность становится (если вообще становится) четко определенной. На это есть множество различных взглядов, называемых *интерпретациями квантовой механики*, поэтому проблема измерения остается под вопросом.

В любом случае Эйнштейн не соглашался ни с чем из перечисленного. Новая роль наблюдения и наблюдателя, которым в квантовой механике была придана загадочная способность осуществлять «коллапс волновой функции», вызвала у Эйнштейна отвращение. Он настаивал на том, что физика должна описывать объективную реальность, не зависящую ни от каких наблюдений, подчеркивая, что «луна должна быть на месте, даже когда мы на нее не смотрим» [25, р. 9]. Поэтому он постоянно приводил аргументы в пользу того, что квантовая механика является эффективным, но лишь приблизительным описанием реальности, вполне объективной и детерминированной, пусть и исключительно сложной.

После каждого его довода и мысленного эксперимента в пользу такого классического реализма Бор опровергал критику Эйнштейна, стремясь показать, что волновая функция дает полное описание реальности, а квантовая механика не является просто каким-то полезным приближением. Этот обмен мнениями и аргументами запомнился как, вероятно, самое впечатляющее состязание двух гениальных умов в истории науки, известное как дискуссия Эйнштейна и Бора. Эйнштейн придумывал мудреный мысленный эксперимент, с виду нарушающий принципы квантовой механики или демонстрирующий ее логическую несостоятельность, а Бор должен был защитить теорию, показав, где Эйнштейн ошибся. Во всех раундах этой интеллектуальной игры Бор так или иначе выходил победителем (самый примечательный случай – когда Бор использовал общую теорию относительности Эйнштейна, чтобы доказать неправоту Эйнштейна). Казалось бы, Бор победил во всех раундах... Кроме последнего.

Последний и самый влиятельный эпизод этого спора известен сегодня как парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР). Именно этот этап спора и его окончательное экспериментальное разрешение почти столетие спустя отмечено Нобелевской премией по физике за 2022 год, и поэтому он заслуживает более подробного обсуждения.

Парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена

В мае 1935 года в журнале *Physical Review* [12] появилась статья под названием «Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?». Она была подписана Альбертом Эйнштейном, Борисом Подольским и Натаном Розеном. Несмотря на вопросительный знак в названии, было ясно, что авторы уверены в том, что они окончательно доказали «неполноту» квантовой теории. И у них были веские аргументы. По сути, они утверждали, что волновая функция – математический объект, который, согласно квантовой механике, должен был представлять полную информацию о физической системе – на самом деле представляет лишь некое «неполное» приближение к физической реальности. То есть, как они утверждали, в хорошей полной физической теории каждый данный, локальный, наблюдаемый (реально или потенциально) «элемент физической реальности» должен найти свое место в универсальном математическом описании. По мнению авторов, в квантовой механике этого не происходит. Их точка зрения заключалась в том, что в квантовом описании чего-то не хватает, что, вероятно, есть некоторые свойства физических систем (такие свойства в современной терминологии называются «скрытыми переменными» – *hidden variables*), которые не были учтены квантовой теорией. Или, по крайней мере, соответствие между волновой функцией и физической системой является не настолько точным (один к одному), как утверждают сторонники квантовой теории. Другими словами, авторы настаивали, что квантовой теории не хватает «биективной (взаимно однозначной) полноты», как это позже назвали некоторые авторы [14]).

Идея этой знаменитой статьи заключается в том, чтобы рассмотреть случаи физических систем, которые взаимодействовали в прошлом, а затем были *разделены*. Например, мы можем рассмотреть две частицы, составившие связанную систему (например, электрон и протон, образующие атом водорода), которая впоследствии распалась, в результате чего две частицы разлетелись в противоположных направлениях. В таких случаях, как правило, можно сделать косвенный вывод о каком-то свойстве одной из частиц, проведя соответствующее измерение другой частицы в паре. Например, если нам известен начальный импульс всей системы (например, он равен нулю) и этот импульс сохраняется, то, измерив импульс одной частицы, мы сразу же узнаем и импульс другой (он должен быть такой же величины, но противоположно направленным, так чтобы их векторная сумма осталась нулевой). Разумеется, это должно быть справедливо независимо от расстояния между частицами в момент измерения. В принципе, это позволяет нам узнать и точно предсказать импульс далекой частицы, проведя измерения близкой частицы.

Тот факт, что мы можем точно знать импульс удаленной частицы, не подвергнув ее возмущению (мы не проводили никаких измерений над ней, только над ее напарницей), с точки зрения ЭПР означал, что этот импульс должен быть чем-то реальным. Тот, кто в следующий раз измерит импульс этой другой частицы, гарантированно (т. е. со стопроцентной вероятностью) получит именно предсказанный результат. Авторы утверждали, что это возможно только в том случае, если удаленная частица действительно обладает реально существующим значением импульса, другими словами, если он является определенным «элементом реальности»: «Если, никоим образом не возмущая систему, мы можем с уверенностью (то есть с вероятностью, равной единице) предсказать значение некоторой физической величины, значит, существует элемент *реальности*, соответствующий этой величине» [12].

Аналогичным образом оказывается возможным узнать максимально точное (разумеется, с учетом погрешностей измерения) местоположение удаленной частицы (измерив положение более близкой), из чего по тем же соображениям следует, что положение этой частицы тоже должно быть вполне определенным и реальным свойством – элементом реальности. Поскольку в момент измерения одной из частиц две частицы могут находиться на расстоянии многих световых лет друг от друга, такое измерение не может немедленно повлиять на удаленную частицу. Следовательно, если она имеет определенный импульс после измерения импульса своей напарницы, то она должна была иметь его *всё время*. То же самое с положением. Следовательно, вопреки соотношениям Гейзенберга и их интерпретации Бором частица должна обладать и определенным импульсом, и определенным положением (с точными в пределе значениями обеих величин). Если квантовая механика не может описать оба этих свойства одновременно, это означает, что она неполная.

В этой последней части рассуждений авторы молчаливо опирались на то, что обычно называют принципом локальности (близкодействия), т. е. на идею о том, что никакое влияние не может осуществиться сразу и непосредственно на расстоянии (более конкретно, что никакое влияние не может распространяться быстрее света). Другими словами, неотъемлемой частью успешного механического описания реальности всегда была идея, что материя может влиять на другую материю только вблизи, «локально». Это значит, что можно воздействовать только на тот фрагмент материи, который находится в *непосредственной* близости от другого (так сказать, механически «тянуть и толкать»), и что только таким образом любое взаимодействие может распространяться в пространстве. В начале XX века Эйнштейн закрепил эту точку зрения, показав, что скорость этого распространения всегда строго ограничена скоростью света, и уточнив в общей

теории относительности, что то же самое справедливо для гравитационного взаимодействия.

Хотя мы в общих чертах сформулировали основной аргумент ЭПР против полноты квантовой механики, следует рассмотреть его более подробно, особенно в качестве прелюдии к последующим событиям. Авторы ЭПР обратили внимание на то, что тип связи (или, в математической терминологии, тип корреляции), который, согласно квантовой механике, существует между частицами (системами), взаимодействовавшими в прошлом и затем разделенными, является весьма странным с точки зрения здравого смысла классической физики. На самом деле, как они отметили, квантовая механика предсказала целый класс многочастичных состояний с такими странными свойствами, которые не имеют аналогов в классической физике. Сегодня мы называем такие многочастичные состояния «запутанными» (entangled).

Например, мы можем внимательнее рассмотреть волновую функцию (или, в современной терминологии, вектор состояния, или просто состояние), соответствующую двум частицам со спином $1/2$, чьи компоненты «выстроены в противоположных направлениях» в том смысле, что их суммарный спин равен нулю. Другими словами, хотя каждая из частиц по отдельности в некотором смысле «закручена» и, следовательно, обладает осью и направлением вращения (спином), общий момент импульса (физическая мера вращения) равен нулю. Это похоже на рассмотренный выше случай двух частиц с импульсом, только здесь из соображений математической простоты мы рассматриваем не импульс, а момент импульса. Чтобы практически получить такое состояние, две частицы, как правило, должны были прежде взаимодействовать, образуя связанное состояние, или одновременно генерироваться в каком-то физическом процессе. Математически это состояние двух частиц в обозначениях Дирака имеет вполне наглядную даже для профанов форму:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle). \quad (1)$$

Здесь $|\uparrow\rangle$ обозначает спин частицы, направленный вдоль положительной оси Z , т. е. «вверх» (т. е. частица «закручена» вокруг оси Z против часовой стрелки, если смотреть сверху), а $|\downarrow\rangle$ обозначает противоположное направление спина. Тогда выражение $|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$ соответствует физической ситуации, когда спин первой частицы ориентирован вверх, а спин второй частицы – вниз. Следовательно, z -компоненты их спинов в сумме дают нуль. Общее состояние имеет два подобных выражения, но второе из них «противоположно»: первая частица на этот раз имеет спин вниз, а вторая – спин вверх. Чтобы упростить рас-

смотрение этих двух частиц, мы можем представить, что первая из этих двух частиц направляется к исследователю по имени Алиса, а вторая – к исследователю по имени Боб (здесь мы придерживаемся привычного соглашения об именах воображаемых экспериментаторов в работах на эту тему). Тогда $|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$ обозначает, что частица Алисы закручена вверх, а частица Боба – вниз, а для выражения $|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle$ дело обстоит противоположным образом. Комбинация этих двух членов вместе с относительным знаком минус математически гарантирует, что полный собственный момент импульса равен нулю вдоль *любой* оси (не только вдоль оси z). Числовой коэффициент $1/\sqrt{2}$ – это так называемая общая нормировка (имеющая значение для оценки вероятностей), для понимания парадокса она не имеет решающего значения. В совокупности эти два выражения имеют следующую простую интерпретацию: если частица Алисы закручена вверх, то частица Боба закручена вниз, и наоборот.

Если говорить точнее, то формализм квантовой механики рассказывает нам еще пару вещей о частицах в таком состоянии. Во-первых, если мы измерим спин частицы Алисы вдоль оси z , то в 50 % случаев получим результат «вверх», а в остальных 50 % – «вниз». То же самое относится и к частице Боба. Кроме того, формализм говорит нам, что если частица Алисы при измерении спина по оси z окажется со спином «вверх», то измерение спина по оси z частицы Боба со стопроцентной уверенностью даст результат со спином «вниз».

Это означает, что после измерения спина частицы Алисы и получения результата «вверх» состояние частицы Боба больше не является неоднозначным (т. е. приводящим к исходам «вверх» и «вниз» с равными шансами), а стало точно $|\downarrow\rangle$. И наоборот: обнаружение того, что частица Алисы имеет спин в направлении «вниз», показывает, что частица Боба имеет спин «вверх». Это означает, что в результате измерения частицы Алисы состояние частицы Боба было автоматически изменено или *обновлено* до значения $|\uparrow\rangle$. Другими словами, измерив z -спин первой частицы, мы автоматически узнали и z -спин другой частицы и, согласно квантовому формализму, тем самым изменили (т. е. *обновили*) волновую функцию спина другой частицы.

И этот вывод *не зависит* от расстояния между двумя частицами: даже если другая частица находится за много световых лет от нас, измерив спин первой частицы, мы сможем узнать ориентацию спина второй. В этом нет ничего удивительного: нам уже известно, что два спина должны быть противоположными, поэтому измерение одного напрямую определяет измерение другого. Мы обновили наши знания о спине второй частицы, и если

ее волновая функция выражает лишь наши знания о ней, нет ничего загадочного в том, что волновая функция сразу же изменилась, несмотря на то что частица находится на расстоянии многих световых лет.

Всё это пока не является особенно показательным. Но главная мысль авторов заключается в том, что всё сказанное по-прежнему остается в силе, если мы решим измерять спин вдоль оси x , а не вдоль оси z . Тот же самый вектор состояния $|\Psi\rangle$ можно записать по существу в той же самой форме, но на этот раз с использованием «правого» $|\rightarrow\rangle$ и «левого» $|\leftarrow\rangle$ спиновых состояний относительно оси x :

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\rightarrow\rangle|\leftarrow\rangle - |\leftarrow\rangle|\rightarrow\rangle). \quad (2)$$

Это означает, что, если мы измерим спин частицы Алисы вдоль x , мы немедленно узнаем и спин x частицы Боба. Более того, согласно формализму это означает, что состояние частицы Боба снова изменится после измерения, проведенного Алисой над своей частицей: если мы получим, что частица Алисы закручена «вправо», то состояние частицы Боба станет $|\leftarrow\rangle$, а если мы получим «левое» x -вращение частицы Алисы, то состояние частицы Боба будет «спроецировано» на состояние $|\rightarrow\rangle$.

Из этого авторы делают два важных замечания. Первое заключается в том, что, *выбирая*, какое измерение провести над своей частицей, Алиса может частично повлиять на то, каким будет новое состояние частицы Боба. А именно Алиса может *выбрать, измерять ли* спин вдоль оси z или вдоль оси x . В первом случае частица Боба окажется либо в состоянии «вниз» $|\downarrow\rangle$ (если Алиса получила результат «вверх»), либо в состоянии «вверх» $|\uparrow\rangle$ (если Алиса получила результат «вниз»). В качестве *альтернативы* Алиса может выбрать измерение x -компоненты спина, и частица Боба окажется либо в состоянии $|\rightarrow\rangle$, либо $|\leftarrow\rangle$. Заметим, что Алиса *не может выбрать*, в каком состоянии окажется частица Боба: в состоянии $|\rightarrow\rangle$ или $|\leftarrow\rangle$. Это произойдет совершенно *случайно* с вероятностью 50 % для обоих исходов. Но она *может выбрать, окажется ли частица Боба в множестве* $\{|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle\}$ (если она решит измерять спин вдоль оси z) или в множестве $\{|\rightarrow\rangle, |\leftarrow\rangle\}$ (если она выберет направление x). И она может решить, в каком из этих двух взаимоисключающих наборов частица Боба окажется после ее измерения, даже если частица Боба находится в этот момент на расстоянии нескольких световых лет.

Это явно противоречило теории относительности Эйнштейна, согласно которой никакое воздействие не может распространяться быстрее света. Как известно, скорость света представляется естественным пределом скорости в нашей Вселенной, поскольку теория относительности показала,

что превышение этого предела связано с целым рядом проблем и парадоксов. На первом месте в этом списке стоят проблемы с причинностью. А именно благодаря открытиям Эйнштейна мы знаем, что движение быстрее света в одной системе отсчета равносильно путешествию в прошлое в другой системе. И хотя научная фантастика выдает желаемое за действительное и мировая аудитория довольно спокойно относится к идее путешествий во времени (при условии, что человек заботится о том, чтобы не убить собственного дедушку), в реальности есть логические несоответствия, которые препятствуют этой гипотетической возможности.

Сама по себе возможность отправлять информацию в собственное прошлое является логическим противоречием: человек может решить отправить себе в прошлое (например, во вчерашний день) любую информацию, которую он вчера еще не получал. Это доказывает, что это либо невозможно, либо не заслуживает того, чтобы называться «отправкой информации в прошлое». Подчеркнем, что эта проблема не имеет пока никакого отношения к свободе воли. Если предположить, что детерминированный робот имеет возможность отправить произвольную информацию в свое прошлое, попытка построить простой алгоритм такого рода отправки продемонстрирует ее неправдоподобность. По этим причинам сейчас, как и во времена написания ЭПР, принято считать, что *никакие воздействия не могут путешествовать быстрее света*.

Авторы ЭПР сделали, казалось бы, естественный вывод: поскольку никакое реальное воздействие не может распространяться быстрее света, постольку с частицей Боба при дистанционном измерении спина со стороны Алисы *ничего не происходит*. Это означает, что «истинная реальность» частицы Боба должна соответствовать какому-то из направлений и в вертикальном множестве (базисе) $\{|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle\}$, и в горизонтальном множестве (базисе) $\{|\rightarrow\rangle, |\leftarrow\rangle\}$. Вектор состояния *изменился* (волновая функция обновилась), но *реальность сама по себе не изменилась*. Следовательно, соответствие между волновой функцией и истинной реальностью частицы Боба *не является однозначным*. Другими словами, Бор был не прав, и квантовая волновая функция *не дает* нам полного описания реальности. Иначе придется предположить, что существует некое «жуткое действие на расстоянии», как Эйнштейн называл это непосредственное влияние, которое измерение первой частицы якобы оказывает на вторую. Для Эйнштейна это действие на расстоянии было абсолютно недопустимо.

Здесь важно понять, что авторы статьи, даже если бы постарались, не смогли бы сделать более сильного утверждения: поскольку квантовая теория предсказывает мгновенное действие на расстоянии, то она нарушает специальную теорию относительности, и, таким образом, *квантовая меха-*

ника просто неверна. Чтобы нарушить предсказания специальной теории относительности, нужно иметь возможность по своему желанию посылать информацию быстрее света. Однако согласно теории относительности возможность отправлять информацию быстрее света, а затем быстрее света возвращать ее обратно из другой системы отсчета означает, что информацию можно фактически отправить в собственное прошлое, а это, как мы объяснили, логически запрещено.

Любопытно, однако, что, несмотря на допущение существования этого «жуткого действия на расстоянии», которое влияет на волновую функцию, квантовая механика предсказывает, что *передача информации* по такому каналу *невозможна*. Это связано с присущей квантовой механике случайностью, из-за которой Алиса *не может* повлиять на то, в каком именно векторе состояний окажется частица Боба (т. е. Алиса может выбрать только один *набор* из двух, в котором она окажется). Квантовые расчеты показывают, что Боб, измеряя спин своей частицы, *не может* определить, измерила Алиса свой спин вдоль оси z или вдоль оси x . Всё, что может Боб, это измерить спин своей частицы вдоль некоторой оси, но, независимо от выбора Алисы, его измерение спина всегда дает вероятность 50 на 50 вдоль любой оси. Следовательно, о решении Алисы нельзя впоследствии узнать на основе измерений Боба, несмотря на то что описание волновой функции Алисы будет различным в обоих случаях.

Если бы квантовая механика предсказывала, что запутанные пары могут использоваться для передачи сигналов быстрее света (очевидно, тогда это позволило бы отправлять информацию в прошлое), это противоречило бы специальной теории относительности. Можно было бы провести реальный эксперимент и проверить, действительно ли таким образом достигается сверхсветовая передача сигналов, тем самым фальсифицировав одну из двух теорий. Но получалась странная ситуация: согласно описанию волновой функции некое влияние распространялось быстрее света, но при этом использовать его для передачи информации невозможно. Как будто две частицы общаются быстрее света каким-то особым заговорщическим способом, который *мы не можем использовать* для передачи информации. Подобное было немыслимо в классической физике, но теперь странным образом допускалось в квантовой физике благодаря ее индетерминизму.

Это, похоже, и способствовало тому, что Эйнштейн назвал эффект «*жутким* действием на расстоянии», а не просто дальнедействием. Таким образом, парадокс ЭПР не смог продемонстрировать ни несостоятельность квантовой механики, ни ее реальное (т. е. измеримое) противоречие со специальной теорией относительности, и по этой причине ЭПР остался лишь *философским* аргументом против предполагаемой полноты

квантовой теории. С другой стороны, для Эйнштейна, который был классическим детерминистом/реалистом и не верил в то, что природа действительно индетерминистична, вопрос о том, можем ли мы использовать это предполагаемое влияние для передачи информации, не казался существенным: по его мнению, никакое реальное влияние не может распространяться быстрее света, и поэтому тот факт, что согласно квантовой механике волновая функция всё же *мгновенно меняется на расстоянии*, был просто доказательством того, что квантовое описание ошибочно.

Второе замечание авторов ЭПР было связано с соотношениями неопределенности, которые мы уже кратко обсуждали. То, что соотношения Гейзенберга справедливы и для x -компонент, и z -компонент спина, означает, что согласно боровскому пониманию соотношений неопределенности, когда спин вдоль оси x точно известен, спин вдоль оси z не может быть точно определен, и наоборот. Но, согласно Эйнштейну, Подольскому и Розену, эта двухчастичная система демонстрирует, что понимание Бора неверно, т. е. что значения спина вдоль обеих осей должны быть полностью определенными и реальными свойствами в любой момент времени, и только из-за несовершенства квантовой теории (т. е. из-за ее неполноты) эти свойства не появляются в математическом формализме.

Их аргументы сводятся к следующему. Предположим, что Алиса сначала измеряет спин своей частицы вдоль оси z и получает результат «вверх». Теперь мы знаем (и квантовый формализм говорит нам), что если Боб измерит спин своей частицы вдоль оси z , то он гарантированно получит результат «вниз». И, по мнению авторов, поскольку z -компонента спина частицы Боба теперь полностью определена и имеет заранее известное значение, то это свойство спина вдоль оси z должно быть в каком-то смысле реально, т. е. в этой частице действительно должно быть что-то, что «произведет» этот гарантированный результат при будущем измерении спина вдоль оси z . Более того, поскольку эти частицы могут быть удалены друг от друга на произвольное расстояние (так, что любое реальное влияние измерения Алисы на частицу Боба исключается), это свойство должно было существовать еще *до* измерения Алисы или, точнее, *независимо от любого измерения*.

Таким образом, это свойство частицы Боба, определяющее результат измерения ее z -спина, должно существовать, даже если Алиса решит не проводить никаких измерений. Авторы называют это реальное свойство частицы Боба элементом *реальности*, соответствующим значению z -спина частицы. Рассуждая аналогичным образом, мы можем заключить, что должно существовать некое свойство частицы Боба (т. е. элемент *реальности*), которая определяет результат измерения спина и вдоль оси x , поскольку значение спина вдоль оси x мы также можем определить, измерив спин частицы Алисы вдоль оси x .

В этих рассуждениях важно, что мы можем узнать спин частицы Боба, *не воздействуя* на эту частицу, т. е. никаким образом не возмущая ее состояние, что в данном случае обеспечивается пространственным расстоянием между частицами, разумеется, при условии справедливости предпосылки о близкодействии, «локальности» (которая в статье ни разу не подвергалась сомнению). А именно если бы имелось *какое-либо влияние* измерения, выполняемого Алисой, на частицу Боба, то оставалась бы возможность, что частица Боба приобретает определенное значение спина только *после* измерения Алисы и *благодаря* ему. Вот почему утверждение «*никоим образом не возмущая систему*» должно было присутствовать в приведенном выше определении элемента реальности, данного Эйнштейном.

Таким образом, авторы пришли к выводу, что *должны* существовать элементы реальности, которые определяют проекцию спина как вдоль оси x , так и вдоль оси Z , и поскольку они не проявляются в квантовом формализме, этот формализм оказывается неполным, а вместе с ним неполной и вся квантовая теория. Авторы полагали доказанным, что соотношение неопределенностей является следствием *эпистемологической* неполноты (т. е. нашей или временной) или принципиальной технической неспособности точно измерить эти элементы реальности и учесть их в теории. Другими словами, с точки зрения Эйнштейна и соавторов, реальность *незыблема*, она всегда обладает четко определенными свойствами, а проблема заключается только в нашем несовершенстве и неполноте нашей теории. Элементы реальности, которые не проявляются в аппарате квантовой механики из-за ее предполагаемой неполноты, позже назовут (в общем случае) «скрытыми переменными».

Всё это противоречило позиции Бора, утверждавшего, что квантовая механика в принципе дает полную картину (не оставляя места для каких-либо «скрытых переменных»), а значение x -спина после измерения спина вдоль Z не является четко определенным свойством природы *как таковым*. Следуя квантовому формализму, это свойство существовало *только в так называемой суперпозиции различных возможностей* и поэтому реально *не имело* четко определенного значения.

Теперь мяч был на стороне Бора. Ему потребовалось несколько месяцев, чтобы ответить, и он сделал это, опубликовав в том же журнале статью с точно таким же названием, как и название статьи ЭПР [7]. Как мы подробнее рассмотрим далее, в ответе Бора подчеркивались «не вполне реалистические» взгляды: если что-то *не существует* вполне определенно само по себе, что тогда могло бы значить, что оно «изменилось на расстоянии»? Бор фактически утверждал, что мы должны принять *новый взгляд на реальность*, который является более целостным (не редукционистским) и не позволяет нам рассматривать две частицы как отдельные сущности.

До сих пор ведутся дискуссии историков науки и философов о том, насколько его защита полноты теории была релевантна и успешна. Многие аналитики полагают, что ответ был неясным и сбивчивым, и даже сам Бор спустя 15 лет сожалел о своем выборе отдельных формулировок по некоторым существенным пунктам [11, 13, 15, 16, 21, 29]. Однако несомненно и то, что после статьи в защиту полноты квантовой механики он получил широкую поддержку научного сообщества, несмотря на то что это повлекло за собой признание некоторой нелокальности, т. е. «жуткого действия на расстоянии». Как бы там ни было, и первоначальный аргумент ЭПР, и ответ Бора носили в то время чисто философский характер. Было исключительно делом личного вкуса, кому какая позиция покажется более убедительной. И казалось, что эта загадка останется нерешенной навсегда. Однако...

Джон Белл. Скрытые переменные

Во втором акте драмы мы переносимся на 30 лет в будущее. Успех новой физики был огромен, и почти никого не волновали философские коллизии Эйнштейна–Бора. Тем временем формализм был отшлифован (в основном благодаря Джону фон Нейману), и на практике теория работала безупречно, не демонстрируя никаких следов неполноты. Проблема измерения всё еще существовала, но не проявлялась в реальных приложениях и вычислениях. Кроме того, наука после Второй мировой войны стала более прагматичной, и физики во взглядах на квантовую механику всё больше склонялись к пресловутому принципу «shut up and calculate» («заткнись и вычисляй»).

Одним из немногих, для кого вопрос об истинном смысле квантовой механики был важнее ее приложений, был ирландский физик Джон Белл. Работая над созданием ускорителей в ЦЕРН в начале шестидесятых, Белл всё же находил время для исследования самых глубоких интерпретационных вопросов квантовой физики. Лично Белл полностью разделял неудовлетворенность покойного Эйнштейна квантовой теорией. Даже одна только квантовая терминология, по его мнению, была неподходящей для физической теории. Это видно из его комментария о книгах по этой теме: «хорошие книги, известные мне, не слишком озабочены физической ясностью. Это видно уже из их словарного запаса. Вот некоторые слова, которые, какими бы законными и необходимыми они ни были в применении, не должны иметь места в формулировках, претендующих на физическую ясность: система, прибор, среда, микроскопический, макроскопический, обратимый, необратимый, наблюдаемый, информация, измерение. ... В этом списке плохих слов из хороших книг худшим из всех является “измерение”» [5].

Поэтому, так же как и Эйнштейна, проблемы измерения и наблюдателя в квантовой механике тревожили Белла даже сильнее, чем отсутствие детерминизма. По его мнению, доминирующая копенгагенская интерпретация квантовой физики (т. е. интерпретация, следующая взглядам Бора и Гейзенберга) содержала слишком много субъективных элементов, в то время как он жаждал описания объективной реальности, которое было бы лишено расплывчатости, индетерминизма и роли наблюдателей [5].

В частности, Белл с большим энтузиазмом отнесся к интерпретации квантовой механики де Бройля – Бома. Согласно их теории «волны-лоцмана»⁴ частицы имеют четко определенные положения в любой момент времени и подчиняются причинным (детерминированным) законам. Эти якобы реальные и четко определенные положения были примером того, что авторы ЭПР считали элементами реальности, не учитываемыми стандартной квантовой механикой. В квантовой механике полное описание систем давалось волновой функцией, и только ею, поэтому если эти четко определенные координаты действительно существовали, они были «скрыты», т. е. не были отражены в квантовом формализме. Таким образом, теория волны-лоцмана была примером модели со скрытыми переменными, которая тем не менее экспериментально неотличима от стандартной, боровской квантовой механики.

Однако, несмотря на реалистичность и детерминированность, эта модель обладала крайне нежелательной особенностью: она была нелокальной, т. е. воздействие в ней теоретически могло распространяться мгновенно. В частности, скорость частицы в этой теории зависела от конфигурации произвольно удаленных частиц, т. е. могла зависеть от того, что происходит в данный момент в других галактиках.

По специальной теории относительности это означало, что воздействие может распространяться и в прошлое, как это видно из некоторых систем отсчета. Но все же модель волны-лоцмана предсказывала, что информация не может реально передаваться быстрее скорости света, поэтому экспериментально она не противоречила специальной теории относительности, иначе ее можно было бы легко фальсифицировать. Однако свойство нелокальности приводило ко многим другим техническим и концептуальным осложнениям. Тем не менее для Белла это был обнадеживающий пример, доказательство того, что можно, если постараться, найти удовлетворительную реалистичную базовую теорию, которая заменит расплывчатый и субъективистский с точки зрения Белла квантовый формализм. Это был бы именно тот тип теории, за который ратовал Эйнштейн в работе ЭПР, если бы не пресловутая нелокальность. Существен-

⁴ В русскоязычных публикациях часто используется калька «волна-пилот». Следуя В.А. Фоку (волна-пилот или, точнее, волна-лоцман), мы переводим pilot-wave как «волна-лоцман».

ный вопрос заключался в том, *может ли существовать подобная реалистичная, но локальная теория и как ее найти.*

Белл, несомненно, был вдохновлен парадоксом ЭПР. Однако экспериментаторам удалось показать в опытах с фотонами, что запутанные пары частиц действительно ведут себя так, как предсказывает квантовая механика: два спина в состоянии, описываемом выражением (1), действительно всегда будут противоположны друг другу (вдоль произвольного направления). Тем не менее это подтверждение пока ничего не отменяло в аргументах Эйнштейна, Подольского и Розена о неполноте теории, ведь они тоже предполагали, что спины всегда будут противоположны.

Как и Эйнштейн, Белл был уверен: тот факт, что два спина всегда оказываются противоположными на произвольных расстояниях, должен указывать на существование неких четко определенных базовых элементов реальности, которые и приводят к таким экспериментальным результатам. Он полагал, что эти спины должны быть реальными, определенными и противоположными друг другу и что роль эксперимента заключается лишь в подтверждении и демонстрации реального положения вещей, а не в том, чтобы *сделать* какой-либо из спинов вполне определенным в момент измерения (как предполагал квантовый формализм).

Белл сравнил случай противоположных спинов в ЭПР-паре с цветными носками своего коллеги Рейнхольда Бертмана, который имел обыкновение носить носки *разных* цветов. В своей работе «Носки Бертмана и природа реальности» [4] он отметил, что когда мы наблюдаем один носок профессора Бертмана, мы сразу же знаем, что другой носок будет другого цвета, еще до того, как мы его увидим, и здесь нет ничего загадочного (кроме привычки Бертмана эксцентрично одеваться), независимо от гипотетического расстояния между носками. Цвета обоих носков были реальными и четко определенными всё время, и момент нашего наблюдения никоим образом не был существенным и не влиял ни на один из носков. Белл был уверен, что как только мы откроем истинную базовую теорию квантов, материя спинов станет не более загадочной, чем материя носков его коллеги.

Однако оставался вопрос: как *доказать*, что спины действительно похожи на такие носки и что результаты измерений лишь *выявляют* уже существующую, четко определенную реальность? До сих пор аргумент ЭПР оставался чисто философским и не было никакого консенсуса по поводу его следствий, не говоря уже о консенсусе в отношении того, действительно ли необходима более полная теория, чем квантовая механика. Чтобы двигаться дальше, требовался аргумент в виде *предсказания*, которое можно было бы *проверить экспериментально* и которое раз и навсегда разрешило бы спор либо в пользу Эйнштейна, либо в пользу Бора.

Однако это казалось невозможным. Проблема заключалась в том, что не было этой гипотетической более полной теории, якобы лежащей в основе всего, за которую ратовал Эйнштейн. *А если мы не имеем теории, то как мы можем проверить и сравнить ее предсказания с наблюдениями?* Всё, что было известно, – это то, что такая теория должна быть реалистичной и локальной, но, кроме этого, она может быть *произвольно сложной*. Эйнштейн не утверждал, что знает ее, – он лишь был уверен, что *она должна существовать*. Однако эта теория вполне могла оказаться настолько сложной, что человеческим существам не под силу ее вывести. Кроме того, даже если бы такая теория существовала, то почему бы она непременно отличалась экспериментально от квантовой механики? вполне могло быть, что все экспериментальные предсказания такой теории вновь не будут отличаться от стандартной квантовой механики, как и в случае с теорией волны-лоцмана.

Но точка зрения Джона Белла была иной. Он предполагал, что любая локально-реалистичная теория должна не только философски, но *наблюдаемо* отличаться от квантовой механики, и в 1964 году ему удалось доказать это [3]. Доказательство известно как *теорема Белла*, и его (вместе с сопутствующими экспериментальными проверками) даже называли «самым глубоким открытием в науке» [22]. Заметим, не в физике, *а во всей науке за всю историю человечества!* Что же заставило дать такую исключительную оценку теореме Белла?

Теорема Белла

Отправной точкой была схема с двумя запутанными частицами, описанная в работе ЭПР. Белл считал, что *тип связи* между частицами, предсказанный квантовой теорией, в некотором смысле «сильнее», чем это можно было объяснить с помощью какой-либо «предсуществующей» реальности (например, определенного цвета носков Бертамана). Потребовалось время, чтобы понять, что для доказательства этого факта недостаточно рассматривать только тот тип измерений, который был в центре внимания в статье ЭПР, в которых результат измерения второй частицы был определен.

Первое, что пришло в голову Беллу: следует более подробно рассмотреть случаи, когда вероятности, связанные с измерениями спинов обеих частиц вдоль разных направлений, равны не только нулю или единице. Осознав это, он вывел математическое соотношение для вероятностей получения результатов измерения спина двух удаленных частиц, но не в случае, когда мы измеряем спин вдоль взаимно параллельных или перпендикулярных направлений, а в случае, когда направления выбраны под некоторыми углами друг к другу.

Например, он рассматривал вероятности следующего типа: если Алиса измеряет спин своей частицы вдоль оси Z и получает результат «вверх»,

то какова вероятность того, что Боб получит спин своей частицы в направлении, наклоненном на 45° по отношению к вертикали? Ему удалось математически доказать, что в *любой* локально-реалистичной вселенной конкретная комбинация таких вероятностей должна удовлетворять определенным неравенствам, известным сейчас как *неравенства Белла*. Главное достижение здесь было в слове *любой*.

Это означало, что в *любой* возможной вселенной, в которой соблюдаются ожидания Эйнштейна (и Белла), т. е. где физические системы имеют четко определенные свойства, независимые от наблюдений, и где влияния не могут распространяться бесконечно быстро, измерения обязательно должны удовлетворять этим неравенствам. Включая произвольно сложные фантастические вселенные, где частицы в принципе могли взаимно общаться и даже вступать в произвольный сговор против экспериментаторов или могли вести себя на Земле иначе, чем на Юпитере (вопрос о том, способны ли мы, люди, понять эти сложные правила, не имел значения).

Важно подчеркнуть, что это само по себе пока *не имело отношения к квантовой механике*. Повторим: неравенство, выведенное Беллом, неизбежно ограничивало *любую* теорию, в которой результаты измерений определялись бы независимыми от наблюдателя четко определенными свойствами материи и в которой существовал бы предел скорости распространения воздействия (т. е. соблюдался принцип локальности). Другими словами, это было ограничение для *всех* возможных теорий и вселенных, отвечающих ожиданиям Эйнштейна, но не для квантово-механической вселенной Нильса Бора.

Это становится ясно из того, что упомянутое неравенство было выведено Беллом из следующих двух, казалось бы, вполне наивных и самоочевидных предположений.

1. *Локальности (близкодействия)*: что бы ни решила сделать Алиса в своей лаборатории, это *не может* повлиять на результаты (или вероятности результатов) одновременных измерений Боба в его произвольно удаленной лаборатории.

2. *Реализма* – предположение, которая по умолчанию всегда присутствовала в выводах. В первоначальной формулировке Белла эта предположение учитывалась путем предположения, что результаты спиновых измерений неизбежно и согласно строгой причинности следуют из некоторых нам неизвестных (и отсутствующих в квантовом формализме), но определенных и независимых от наблюдателя реальных свойств частиц. Другими словами, результаты должны были определяться некоторыми скрытыми переменными.

Математически эти скрытые переменные были явно представлены переменной, обозначаемой как λ [3]. В некоторых последующих формули-

ровках теоремы Белла [24] требование неперменного детерминизма было снято, но предпосылка реализма в той или иной форме осталась благодаря роли переменной λ , по-прежнему представляющей скрытые переменные, и благодаря тому, как именно эти скрытые переменные использовались для получения вероятностей результатов спиновых измерений.

Понять, как удалось доказать такие общие неравенства, можно только рассмотрев само доказательство. Поскольку изложение доказательства требует уравнений и некоторых (хотя и довольно элементарных) математических знаний, мы рассмотрим его в приложении А⁵.

Вся исключительная значимость этих неравенств состоит в том, что Белл первый понял, что *квантовая теория предсказывает экспериментальные нарушения* этих неравенств (в приложении В приведен конкретный математический пример такого нарушения), т. е. появилась возможность **раз и навсегда экспериментально разрешить спор Эйнштейна и Бора**. Неравенства Белла *нарушились* в процессе измерений в физике Бора, в то время как в любой физике Эйнштейна измерения должны были этим неравенствам *удовлетворять*. Ответ на вопрос, удовлетворяют ли реальные физические системы этим неравенствам или нет, мог провести твердую и окончательную границу между взглядами Бора и Эйнштейна. *Другими словами, неравенства Белла впервые в истории науки были способны перевести спор о характере физической реальности из области чистой философии в область экспериментальной физики.*

Теорема Белла, по сути, утверждала, что ни одна локально реалистичная теория никогда *не сможет* в точности воспроизвести все квантово-механические предсказания. Из этого следовало, что невозможно улучшить теорию волны-лоцмана таким образом, чтобы сделать ее локальной и при этом экспериментально неотличимой от стандартной квантовой теории. Теперь стало ясно, что любая реалистичная модель, близко воспроизводящая экспериментальные предсказания квантового формализма, *обязательно будет обладать нелокальными свойствами*. Важно подчеркнуть, что этот вывод справедлив *независимо* от того, ищем ли мы строго детерминированную теорию или даже готовы признать присущую ей случайность (впрочем, это стало ясно только после некоторых обобщений первоначального вывода Белла).

Важно, что величины, ограниченные неравенствами Белла, в принципе *можно было измерить*. Другими словами, наконец-то стало возможным экспериментально получить значения этих величин. Для случаев, в которых квантовая физика предсказывает нарушение неравенств, можно было проверить, выполняется ли ограничение. Если бы в таком эксперименте неравенства оказались выполненными, это противоречило бы квантовым

⁵ Ссылка на математические приложения приведена в приложении к статье на сайте ИИИ.

предсказаниям и стало бы однозначным доказательством того, что квантовая механика нуждается в модификации.

Это означало бы, что вся квантовая теория является лишь неким приближением, имеющим лишь частичную достоверность. Сам Белл считал, что такой исход, к сожалению, маловероятен (его обескураживали огромные практические успехи квантовой механики), но всё же надеялся на «неожиданный результат, который потряс бы мир» [9 р. 31] и фальсифицировал полноту квантовой теории.

Однако если бы измерение показало *нарушение* неравенств Белла, это имело бы революционные философские последствия для всего нашего понимания Вселенной. В таком случае пришлось бы раз и навсегда отказаться от надежды на то, что рациональное реалистическое объяснение явлений в природе, к которому стремился Эйнштейн, может быть когда-либо найдено. Белл, со своей стороны, мог теперь просто сидеть и ждать, пока кто-нибудь проведет этот решающий эксперимент.

Джон ф. Клаузер, Ален Аспэ и Антон Цайленгер. Экспериментальный вердикт

История физики еще почти десять лет ждала финального акта этой основополагающей философской драмы, начавшейся, по сути, еще во времена Эпикура и Лукреция. После новаторского доказательства Белла проходили годы, но почти никто не обращал внимания на его открытие. Даже первого цитирования своей работы Белл ждал несколько лет, собрав лишь несколько ссылок за десятилетие. Дело было не только в том, что его статья была опубликована в малоизвестном журнале *Physics, Physique, Fizika* [3], но, как позже вспоминал молодой физик Джон Ф. Клаузер, работавший в то время постдоком в Калифорнийском университете в Беркли, это была вообще непопулярная тема. Молодой Клаузер вместе со своей коллегой, аспирантом Стюартом Фридманом, станет первым в истории, кто проведет экспериментальную проверку неравенств Белла. Даже после того, как их предупредили, что это исследование может разрушить их карьеру [9, 34], двое молодых ученых продолжали упорно идти своим путем, чтобы в конце концов получить *однозначный экспериментальный ответ на вопрос, кто был прав в великом споре Эйнштейна и Бора.*

С 1964 по 1972 год наше понимание физики находилось в *подвешенном состоянии*: мы знали, что можно раз и навсегда выяснить, является ли наша Вселенная «нормальной» в смысле Эйнштейна (т. е. локальной и реальной) или «странной», как предполагал Бор. Но ответа на этот вопрос по-прежнему не было. И наконец в 1972 году Клаузеру и Фридману удалось провести первый в истории «тест Белла». В отличие от оригинальной работы Белла [3], в которой рассматривались частицы материи со спином $1/2$ (такие как электроны или протоны), в этом эксперименте по практиче-

ским соображениям рассматривались фотоны. Измерялись поляризации пар фотонов, испускаемых в атомном каскаде [17]. Если в анализе Белла спины были противоположными, то здесь поляризации двух фотонов в каждой паре были одинаковыми. Это значит, что каждый раз, когда два фотона попадали на поляризационные фильтры, выровненные в одном направлении, через эти фильтры либо проходили оба фотона, либо не проходил ни один. Задача состояла в том, чтобы измерить так называемые совпадения: как часто оба фотона проходят через соответствующий поляризационный фильтр и как эта вероятность зависит от угла между поляризаторами. Вместо вероятности результатов измерений спина электрона неравенствам Белла должны были удовлетворять (или не удовлетворять) вероятности совпадений поляризаций фотонов. Однако это лишь технические детали, суть эксперимента оставалась прежней.

И вот, наконец, мы услышали решение Природы – без сомнения, в пользу Бора. Полученные экспериментальные результаты идеально соответствовали квантово-механическим предсказаниям, демонстрируя нарушение неравенства Белла на уровне 6,3 сигмы (где всё, что превышает 5 сигм, считается в физике статистически достоверным доказательством). Клаузер, сам симпатизировавший в этом споре Эйнштейну, позже скажет: «Мне было весьма грустно видеть, как мой эксперимент продемонстрировал неправоту Эйнштейна» [30].

Несомненно, Белл был огорчен еще больше, чем Клаузер. Как в большинстве драм есть трагический персонаж, так и в этой драме эту роль примерил на себя Белл. Именно склонность Белла к реализму заставила его исследовать возможности локальных теорий скрытых переменных и в конце концов привела к его теореме. Никто другой так открыто и прямо не выражал свои убеждения, как Белл, и, похоже, ни у кого эти убеждения не были такими сильными. Он был абсолютно уверен, что Эйнштейн должен быть прав, и всё же ему пришлось признать, что это не так:

«По-моему, гораздо разумнее предположить, что фотоны в этих экспериментах несут в себе “программы”, которые были заранее скоррелированы и “указывают” им, как себя вести (т. е. реальные причины полностью определяют реальные следствия). Это настолько разумно, что я уверен: когда Эйнштейн это увидел, а другие отказались это видеть, именно он был рациональным человеком. Другие, хотя история их оправдала, зарывали голову в песок. Я убежден, что интеллектуальное превосходство Эйнштейна над Бором в данном случае было огромным; я вижу пропасть между человеком, который всё ясно видел, и путаником. Очень жаль, однако, но идея Эйнштейна не работает. Разумная вещь просто не работает!» [6].

В другой раз он лаконично выразил свои чувства следующим образом: «Бор был непоследователен, неясен, умышленно темен – и *прав*. Эйнштейн был последовательным, ясным, практичным – и *ошибался*» [20].

Несмотря на то что экспериментальное нарушение неравенств было страшным личным разочарованием Белла, этот эпизод стал прекрасным свидетельством силы научного метода. Хотя каждый ученый обязан иметь собственное мнение, действительно хороший ученый не позволит своим мнениям и желаниям встать на пути к истине.

Несмотря на то что Белл горячо отстаивал позиции Эйнштейна, именно Белл сам привел к окончательной фальсификации его взглядов. Именно Белл опроверг мировоззрение, которое он лелеял как истинное. *И Белл, не колеблясь, признал, что результат его работы и последующих экспериментов Клаузера был не таким, на какой он рассчитывал. Этим Белл еще раз подтвердил свое величие как ученого.*

Закрытие лазеек

Тем не менее и после эксперимента 1972 года у позиции Эйнштейна оставалась некоторая надежда на перспективу. А именно в эксперименте Клаузера и Фридмана 1972 года фотоны попадали на поляризаторы, которые находились на расстоянии всего в паре метров от них в той же лаборатории. Эксперимент проводился циклами по 100 секунд. Это было время накопления данных, в течение которых поляризаторы были ориентированы под фиксированными углами [17]. Суть оригинальной идеи Белла заключалась в том, что два поляризатора, принадлежащие Алисе и Бобу, должны быть *достаточно сильно удалены* друг от друга. Так было нужно, чтобы решение Алисы о том, как ориентировать ее поляризатор, *не могло никаким мыслимым образом повлиять* на фотон, приходящий на сторону Боба. В эксперименте Клаузера имелось достаточно времени, чтобы гипотетическое влияние решения о том, как ориентировать поляризатор в одном углу лаборатории, достигло другого угла, не требуя для этого сверхсветовых скоростей и не конфликтуя с локальными принципами специальной теории относительности.

При чтении статьи Белла создается впечатление, что он даже не предполагал возможность опровержения квантово-механических предсказаний по результатам эксперимента, аналогичного эксперименту Клаузера. Парадоксально, но при этом он продолжал надеяться, что точность квантово-механических предсказаний относительно состояний запутанных пар частиц будет ограничена случаями тех измерений, в которых субсветовые сигналы проходят малые расстояния. Иными словами, он всё еще оставлял лазейку для случаев, когда расстояния больше (или в соответствующие разы меньше):

«Конечно, ситуация меняется, если квантово-механические предсказания имеют ограниченную силу. Возможно, они применимы только к экспериментам, в которых настройки приборов сделаны настолько заранее, чтобы позволить им достичь некоторого “взаимопонимания”, обменива-

ясь сигналами со скоростью, меньшей скорости света. В этой связи эксперименты типа предложенных Бомом и Аароновым, в которых *настройки меняются во время полета частиц*, имеют решающее значение» [3, p. 199].

Мы видим, что Белл призывает к проведению экспериментов, которые устранили бы возможность влияния на результаты обычных субсветовых сигналов. Однако следует отметить, что трудно представить, каким образом два поляризатора/детектора могли бы «общаться», чтобы обмануть экспериментатора. Клаузер рассматривал это как форму паранойи, для которой «необходимо сначала поверить, что пара детекторов и анализаторов, находящихся на расстоянии нескольких метров друг от друга, каким-то образом сговорились между собой, чтобы обмануть экспериментатора» [9]. Тем не менее это оставалось логически возможным, поэтому общепризнано, что Клаузер-Фридмановская экспериментальная ситуация со статическими поляризаторами «страдала» от этой «лазейки локальности», как стали называть эту «параноидальную возможность».

Первый эксперимент, который почти полностью закрыл эту лазейку и удовлетворил первоначальным критериям Белла, был выполнен в 1982 году. Его провели наш второй нобелеат Ален Аспэ и его сотрудники, работавшие в Высшей школе оптики в Орсе [2]. Среди прочих экспериментальных усовершенствований Аспэ нашел способ эффективно менять ориентацию поляризаторов «на лету», т. е. пока фотоны находятся на пути к детекторам. Поляризаторы (с соответствующими детекторами за ними) были расположены на противоположных концах лаборатории на расстоянии шести метров от источника фотонов (т. е. в 12 метрах друг от друга). Это соответствовало времени пролета в 20 наносекунд от рождения фотонов до их обнаружения. Вместо того чтобы физически поворачивать поляризаторы, что технически невозможно сделать за столь короткое время, он заменил поляризатор с каждой стороны установкой, состоящей из так называемого оптического переключателя и двух поляризаторов, ориентированных в разных направлениях. Переключатели позволяли направлять входящие фотоны на разные поляризаторы, и это изменение направления происходило регулярно, примерно каждые 10 наносекунд.

Таким образом, фотоны поступали на поляризаторы, угол которых менялся, и это изменение угла происходило во время полета фотонов. Сигнал, проходящий от одной стороны к другой с субсветовой скоростью, не имел никакой возможности прибыть «вовремя» и «проинформировать» находящуюся там физическую систему о текущем состоянии оптического переключателя. Результаты оказались непоколебимыми, подтвердив ожидания Бора с точностью до пяти стандартных отклонений.

Последние надежды на то, что наша Вселенная всё еще может быть локально реалистичной, рассеялись. Однако это было еще не совсем то, что

задумывал Белл. В идеале экспериментатор должен быть способен ориентировать свой поляризатор *произвольно или случайно* так, чтобы у системы с другой стороны не было абсолютно никакой возможности предсказать, какой угол был выбран. Этого не позволяла установка «Аспэ», где вариации поляризации были периодическими, а значит, строго говоря, легко предсказуемыми (на тот случай, как сказал бы Клаузер, если приборы с двух сторон могли «общаться и сговориться» против экспериментатора и были достаточно «умными», чтобы уловить закономерность вариаций).

Каким бы параноидальным такое требование ни являлось, оно логически необходимо, если мы стремимся к *абсолютной* уверенности, что здесь не остается места для какой-либо локально реалистичной модели. Первым, кто закрыл эту лазейку локальности (или связи) с помощью сверхбыстрых генераторов случайных чисел, стал в 1998 году третий нобелевский лауреат Антон Цайлингер со своей командой из Университета Инсбрука [32]. *Его эксперимент продемонстрировал нарушение неравенств Белла до ошеломляющих 30 стандартных отклонений.*

После тщательного анализа физики поняли, что, строго говоря, лазейка локальности была не единственной потенциальной лазейкой. Кроме нее они выделили также лазейку детектирования (связанную с низкой эффективностью используемых детекторов), лазейку совпадений (связанную с несовершенством методов, используемых для определения того, какие два из обнаруженных фотонов принадлежат одной паре) и лазейку памяти (параноидальная возможность того, что скрытые переменные могут использовать память о прошлых измерениях для заговора против экспериментаторов). Однако, объединив усилия многих экспериментальных групп по всему миру, в 2015 году мы наконец получили первые «безлазейковые» подтверждения нарушения неравенств Белла (один из трех таких экспериментов, проведенных в 2015 году, был выполнен опять же группой Цайлингера [19]).

Стоит также отметить, что некоторые из этих дополнительных лазеек даже не появляются в обобщениях теоремы Белла на запутанные состояния трех и более частиц. Безлазейковые обобщения такого рода были открыты Даниэлем Гринбергером, Майклом Хорном и Антоном Цайлингером в 1989 году (так называемая теорема GHZ [10]), а соответствующие экспериментальные проверки, проведенные также Цайлингером [23], в очередной раз безусловно *фальсифицировали локальный реализм*. В этих случаях несовместимость локального реализма с нашей Вселенной можно было проверить на уровне **одного измерения**, без необходимости сбора достаточной статистики и рассмотрения каких-либо вероятностей или неравенств вообще.

После всех этих экспериментов больше не оставалось ни малейшего сомнения: *наш мир невозможно объяснить никакой локально-реалистичной теорией, и именно Бор победил в знаменитых дебатах*. Все эти лазейки не спасли ло-

кальный реализм. Спустя годы пришло время, наконец, привыкнуть к этому факту и серьезно отнестись к выводам.

Супердетерминизм

Следует отметить, что, стремясь к предельной математической точности, физики часто упоминают еще одну гипотетическую лазейку под названием «супердетерминизм». Если лазейка локальности, по словам Клаузера, уже была параноидальной, то эта должна быть названа суперпараноидальной: что если заговор природы (чтобы одурачить физиков и создать ложное впечатление о нарушении неравенств Белла) настолько грандиозен, что ни случайный, ни произвольный выбор углов поляризации не являются достаточно независимыми?

В принципе, Вселенная всё еще может быть реальной и локальной, более того – детерминированной. Для этого она всего лишь должна быть точно настроена в момент Большого взрыва так, что каждый раз, когда мы пытаемся проверить неравенства Белла, наши попытки оказываются тщетными, поскольку всё срежиссировано. Всё так точно настроено заранее (и детерминистское предположение делает такую идею *логически* непротиворечивой), что каждый раз, когда мы пытаемся измерить удаленные частицы в паре Белла, частица Боба и/или оборудование «знает», какой угол выберет Алиса не потому, что каким-то образом был подан сигнал быстрее света, а просто потому, что всё развивается по сценарию, написанному давным-давно коварным сценаристом, основным мотивом которого было надуть наивных физиков (вспомним «злого демона» Декарта!).

Джон Клаузер, а также Абнер Шимони и Майкл Хорн (ученые, которые вместе с Ричардом Холтом были авторами наиболее популярной CHSH-версии неравенств Белла) в своей работе 1976 года [28] проиллюстрировали этот тип конспирологических идей, отметив возможность того, что производители измерительного оборудования могли подстроить приборы так, чтобы получить подготовленный набор ложных экспериментальных результатов. Но чтобы это сработало, заговорщики также должны были проинструктировать секретарей экспериментаторов с обеих сторон так, чтобы те «тихо шептали им на ухо» о подходящем выборе углов поляризаторов для каждого эксперимента. Всё должно быть тщательно организовано, чтобы продемонстрировать мнимое нарушение неравенств Белла во вселенной, которая в остальном является локально реальной.

Оказалось, однако, что даже этот сценарий не работает, поскольку все детали такого заговора должны были быть определены гораздо раньше, возможно, уже на заре времен. Тест Белла, проведенный в 2018 году, подтвердил нарушение неравенств с использованием вместо случайных генераторов свет, испущенный *7,8 млрд лет назад* далекими квазарами. Согласно

супердетерминизму эти квазары должны были быть частью космического заговора, заботясь о том, какой свет испускать, чтобы ученые на Земле 7,8 млрд лет спустя были должным образом обведены вокруг пальца [26]. Кроме того, в качестве защиты от возможных систематических или заговорщических эффектов в 2015 году в одном из тестов Белла без лазеек [27] был задействован ряд ресурсов поп-культуры для случайного (рандомного) варьирования решений об углах, которые используются в эксперименте. В частности, экспериментаторы применили двоичные биты цифровых версий фильмов, таких как франшиза «Назад в будущее» (все три части, из которых третья была использована в обратном порядке), эпизоды Star Trek, Doctor Who, «Монти Пайтон и Священный Грааль». Для пушей убедительности они также применили ко всем данным операцию XOR⁶ с использованием цифр числа π . «Гипотетическая причина, которая привела к наблюдаемой статистике, должна была бы точно “управлять” процессами, ведущими к созданию оцифрованных версий этих артефактов. Причем управлять таким образом, чтобы при обработке результатов генераторов случайных чисел получалась именно та последовательность, которая возникла в процессе экспериментальных вариаций» [24].

Отрицание гипотезы супердетерминизма иногда связывают с требованием свободы воли. Это вводит аудиторию в заблуждение. Конспирологическая идея супердетерминизма не имеет отношения к этой древней и открытой философской проблеме. Хотя возможность существования свободы воли (или истинной нередуцируемой случайности, присущей природе) действительно логически гарантирует, что супердетерминизм невозможен, отсутствие свободы воли ни в коем случае не подразумевает супердетерминизма. Как должно быть ясно из вышеприведенного обсуждения, супердетерминизм (и, следовательно, отсутствие свободы воли), по-видимому, также требует некой *преднамеренной* сверхтонкой настройки, специально направленной каким-то неизвестным, способным на преднамеренный выбор агентом, на то, чтобы обмануть настырных физиков, интересующихся неравенствами Белла. (Здесь мы обсуждаем супердетерминизм, но существуют также варианты, предполагающие «ретрокаузальность», т. е. воздействие на прошлое из будущего. Это похоже на тушение огня бензином, довольно сомнительный способ для решения проблемы нелокальности.)

Как идея космического заговора, лазейка супердетерминизма экспериментально нефальсифицируема. Однако если супердетерминизм истинен, то такая мелочь, как невозможность сделать правильные выводы из нарушения неравенств Белла, должна нас волновать меньше всего. Как отмечают Клаузер и его соавторы, *при принятии идеи супердетерминизма вся научная, и не только научная, деятельность будет лишена всякого смысла*: «Если мы будем

⁶ Exclusive or – Wikipedia.

исходить из предположения, что есть космические заговоры такого рода, мы заранее отказываемся от всего предприятия по открытию законов природы путем экспериментов» [28, р. 7]. Аналогичный вывод делает и Цайлингер, который утверждает, что если бы супердетерминизм был истинным, «задавать природе вопросы в экспериментах было бы бессмысленно, поскольку коварная природа могла бы заранее определить, каковы эти наши вопросы, и смогла бы сделать таким образом, чтобы мы пришли к ложной картине» [1, р. 266].

Но логические последствия супердетерминизма могут быть гораздо абсурднее, чем просто бессмысленность науки. Если следовать тем же рассуждениям, то Земля могла бы быть прямо сейчас наводнена некими инопланетянами, которые роятся вокруг нас. При этом нечто постоянно мешает нам смотреть в нужном направлении в нужный момент, точно так же как якобы заранее настроенные приборы коварно диктуют Алисе и Бобу, как повернуть свои поляризаторы.

Другими словами, вместо того чтобы быть серьезной гипотезой о природе, супердетерминизм скорее свидетельство того, какую высокую цену готовы заплатить некоторые люди, лишь бы избежать экспериментально доказанного вывода о том, что наша Вселенная *не является* локальной и реалистичной (всё же есть некоторые ученые, готовые серьезно отнестись к супердетерминизму [24]). *Такая огромная цена лишь подчеркивает глубину изменений в нашем мировоззрении, к которым нас вынуждают неравенства Белла и их нарушение.*

Выводы

В этой части мы рассмотрели историческую и логическую последовательность событий, которые привели к теореме Белла и к экспериментальному подтверждению нарушения неравенств Белла. В следующей статье мы обсудим мировоззренческие следствия этих результатов и их влияние на современную научно-философскую картину мира.

Переводчик Аркадьев Михаил Александрович,

доктор искусствоведения, заслуженный артист РФ,

дирижер, композитор, музыкальный теоретик

m.arkadiev@gmail.com

От переводчика. Благодарю автора Игоря Салома за детальное внимание к переводу, важные пояснения и полезные предложения в процессе работы. Я признателен Алексею Семихатову (ФИАН), Алексею Цвелику (BNL) и Алексею Бурову (Fermilab) за ценные редакторские замечания.

Особенная благодарность моей жене Татьяне Стафеевой за существенную корректорскую помощь в работе над статьей.

Редколлегия журнала «Идеи и идеалы» благодарит редколлегию журнала «Флогистон» (ISSN 0354-6640) за возможность опубликовать перевод данной статьи. Оригинал см.: Salom, I. 2022 Nobel Prize in Physics and the End of Mechanistic Materialism. *Phlogiston*, 2023, vol. 31, p. 169–236. <https://www.scribd.com/document/694233925/Phlogiston-broj-31>

References

1. Zeilinger A. *Dance of the Photons: from Einstein to quantum teleportation*. New York, Farrar, Straus and Giroux, 2010. 305 p.
2. Aspect A., Dalibard J., Roger G. Experimental Test of Bell's nequalities Using Time-Varying Analyzers. *Physical Review Letters*, 1982, vol. 49 (25), pp. 1804–1807. DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.1804.
3. Bell J.S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics Physique Fizika*, 1964, vol. 1 (3), pp. 195–200. DOI: 10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195.
4. Bell J.S. Bertlmann's socks and the nature of reality. *Speakable and Unspeakeable in Quantum Mechanics. Collected Papers on Quantum Philosophy*. Cambridge University Press, 2004, pp. 139–158. DOI: 10.1017/CBO9780511815676.018.
5. Bell J. Against 'measurement'. *Physics World*, 1990, vol. 3 (8), p. 33. DOI: 10.1088/2058-7058/3/8/26.
6. Bernstein J. *Quantum Profiles*. Princeton, Princeton University Press, 1991. 178 p. DOI: 10.1515/9781400820542.
7. Bohr N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Physical Review*, 1935 vol. 48 (8), pp. 696–702. DOI: 10.1103/PhysRev.48.696.
8. Bohr N. *Atomic Physics and Human Knowledge*. London, New York, John Wiley and Sons, 1958.
9. Clauser J.F. Early History of Bell's Theorem. *Coherence and Quantum Optics VIII: Proceedings of the Eighth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics, held at the University of Rochester, June 13–16, 2001*. Boston, MA, Springer, 2003, pp. 19–44. DOI: 10.1007/978-1-4419-8907-9_2.
10. Greenberger D.M., Horne M.A., Zeilinger A. Going Beyond Bell's Theorem. Kafatos, Menos (ed.). *Bell's Theorem, Quantum Theory, and Conceptions of the Universe*. Heidelberg, Springer, 1989, pp. 69–72. DOI: 10.1007/978-94-017-0849-4_10.
11. Drezet A. Why Bohr was wrong in his response to EPR. *arXiv:2305.06859v1*. 2023.
12. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, 1935, vol. 47 (10), pp. 777–780. DOI: 10.1103/PhysRev.47.777.
13. Fine A., Beller M. Bohr's response to EPR. J. Faye, H. Folse (eds). *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. New York, Kluwer, 1994, pp. 1–31.
14. Fine A., *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*. 2nd ed. Chicago, University of Chicago Press, 1996.

15. Fine A., Ryckman T.A. The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Ed. by N. Zalta. Summer 2020. Available at: <https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/qt-epr> (accessed 13.08.2024).
16. Fine A. Bohr's Response to EPR: Criticism and Defense. *Iyyun: The Jerusalem Philosophical Quarterly*, 2007, vol. 56, pp. 31–56. Available at: <http://www.jstor.org/stable/23354464> (accessed 13.08.2024).
17. Freedman S.J., Clauser J.F. Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories. *Physical Review Letters*, 1972, vol. 28 (14), pp. 938–941. DOI: 10.1103/PhysRevLett.28.938.
18. Frescura F.A.M., Hiley B.J. Algebras, quantum theory and pre-space. *Revista Brasileira de Física*, July 1984, Volume Especial “Os 70 anos de Mario Schonberg”, pp. 49–86.
19. Giustina M., et al. Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons. *Physical Review Letters*, 2015, vol. 115 (25), p. 250401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.250401.
20. Graham F. Random Acts of Science. *The New York Times*, 2010, June 11.
21. Halvorson H., Clifton R. Reconsidering Bohr's Reply to EPR. *Non-locality and Modality*. Dordrecht, Springer, 2002. DOI: 10.1007/978-94-010-0385-8_1.
22. Stapp H.P. Bell's Theorem and World Process. *Nuovo Cimento B*, 1975, vol. 29B (2), pp. 270–276. DOI: 10.1007/BF02728310.
23. Pan J.-W., Bouwmeester D., Daniell M., Weinfurter H., Zeilinger A. Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger–Horne–Zeilinger entanglement. *Nature*, 2000, vol. 403, pp. 515–519.
24. Myrvold W., Genovese M., Shimony A. Bell's Theorem. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Ed. by N. Zalta. Fall 2021. Available at: <https://plato.stanford.edu/archives/fall2021/entries/bell-theorem> (accessed 13.08.2024).
25. Mermin N.D. *Boojums All The Way Through: communicating science in a prosaic age*. Cambridge University Press, 1990. 308 p.
26. Rauch D. Cosmic Bell test using random measurement settings from high-red-shift quasars. *Physical Review Letters*, 2018, vol. 121, p. 080403.
27. Shalm L.K., et al. Strong loophole-free test of local realism. *Physical Review Letters*, 2015, vol. 115, p.250402.
28. Shimony A., Horne M.A., Clauser J. Comment on “The theory of local beables”. *Epistemological Letters*, 1976, vol. 13, pp. 1–8.
29. Fujita S. How Did Bohr Reply to EPR? From “The Two Faces of Realism: Bohr and Bell”. *Journal of the Philosophy of Science*, 1994, vol. 27. Japan.
30. Skuse B. Nobel Prize in Physics 2022. *Lindau Nobel Laureate Meetings*. Available at: <https://www.lindau-nobel.org/blog-nobel-prize-in-physics-2022-proving-and-using-the-peculiar-quantum-nature-of-reality/> (accessed 13.08.2024).
31. Heisenberg W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 1927, vol. 43, p. 172. Translated as “The physical content of quantum kinematics and mechanics” in *Quantum Theory and Measurement*, J. Wheeler and W. Zurek eds. (Princeton University Press, Princeton, 1983).

32. Weihs G., Jennewein T., Simon C., Weinfurter H., Zeilinger A. Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions. *Physical Review Letters*, 1998, vol. 81 (23), pp. 5039–5043. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.5039.
33. Heisenberg W. *The Physical Principles of the Quantum Theory*. Courier Dover Publications, 1949. ISBN 978-0-486-60113-7.
34. Clavin W. Proving that Quantum Entanglement is Real. *Caltech*, 2022, September 20. Available at: <https://www.caltech.edu/about/news/proving-that-quantum-entanglement-is-real> (accessed 13.08.2024).
35. Zukowski M., Brukner Č. Quantum nonlocality – it ain't necessarily so. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2014, vol. 47 (42), p. 424009. DOI: 10.1088/1751-8113/47/42/424009.

Статья поступила в редакцию 19.03.2024.

Статья прошла рецензирование 02.04.2024.

The article was received on 19.03.2024.

The article was reviewed on 02.04.2024.