

К.Р. Поппер

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ И РАСКОЛ В ФИЗИКЕ

ИЗ ПОСТСКРИПТУМА К "ЛОГИКЕ НАУЧНОГО ОТКРЫТИЯ"

ПРЕДИСЛОВИЕ 1982 ГОДА: О РЕАЛИЗМЕ И ЗДРАВОВОМ СМЫСЛЕ В ИНТЕРПРЕТАЦИИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Перевод и комментарии А.А. Печенкина

Перед естественными науками и натуральной философией стоит грандиозная задача – создать когерентную и понятную картину Вселенной. Вся наука в целом – это космология, и все известные нам цивилизации старались понять мир, в котором мы живем, нас самих, а также наше знание как часть этого мира.

В своих усилиях понять мир физическая наука, представляющая собой удивительное сочетание спекулятивного творчества и открытости опыту, достигла фундаментальной значимости. Так было не всегда и возможно в будущем все также будет иначе. Однако и сейчас создается впечатление, что наш мир был миром физики задолго до того, как возник мир химии и тем более мир биологии.

Сегодня физика находится в кризисе. Физическая теория достигает невероятных успехов, она постоянно генерирует новые проблемы, она решает как старые проблемы, так и те, которые только что возникли. Отчасти кризис физики проявляется в том, что ее фундаментальные теории находятся в состоянии перманентной революции. Впрочем, это, на мой взгляд, нормально для зрелой науки. Существует, однако, другой аспект того кризиса, который сейчас происходит, – это кризис понимания.

Грубо говоря, кризис понимания возник в физике вместе с копенгагенской интерпретацией квантовой механики. Он таким образом чуть старше, чем первое издание "Логики научного открытия". В настоящей части своего Постскрипума я снова постарался прояснить то, что лежит в основе того кризиса понимания, который характерен для современной физики.

I

Как я считаю, можно указать на две причины возникновения этого кризиса: а) проникновение субъективизма в физику; б) убежденность в том, что квантовая теория содержит полную и окончательную истину.

Субъективизм в физике восходит к нескольким великим ошибкам. Одна из них – позитивизм (или идеализм) Маха. Через Рассела он распространился на Британские острова (где его основы были заложены уже Беркли), через молодого Эйнштейна – в Германию (1905). Позитивизм был отвергнут Эйнштейном, когда ему шел пятый десяток (1926), а на склоне лет он глубоко сожалел о своем субъективистском прошлом (1950) [1]. Другая ошибка еще более древняя. Это субъективистская интерпретация исчисления вероятностей, которая благодаря Лапласу стала центральной догмой теории вероятностей.

Основная наша тема здесь – реализм. Это тема реальности физического мира, в котором мы живем, тема гипотез, согласно которым мир существует независимо от нас, что он существовал еще до того, как появилась жизнь, что он будет продолжать свое существование и долгое время после того, как мы все исчезнем.

Доводы в пользу реализма содержатся в разных моих работах [2]. Эти доводы отчасти рациональные, отчасти *ad hominem*, отчасти даже этические. Мне представляется, что критическая атака на реализм, хотя в интеллектуальном отношении она интересна и важна, совершенно неприемлема, особенно после двух мировых войн и реальных, но, вообще говоря, не неизбежных, страданий, принесенных в изобилии этими войнами, что доводы против реализма, основывающиеся на современной теории атома – квантовой механике, должны умолк-

нуть перед памятью о реальных событиях в Хиросиме и Нагасаки. (Сказанное мною не умаляет моего восхищения современной теорией атома и квантовой механикой, а также теми учеными, которые работали и сейчас работают в этих областях.)

Впервые реализм был поставлен под вопрос скептицизмом и особенно некоторыми аргументами Декарта, который, стремясь к большему эффекту, попытался вывести из него наиболее радикальные и действительно абсурдные заключения. Затем последовала критика епископа Беркли, который, как до него кардинал Беллармино, опасался, что наука при общественном интересе к ней вытеснит христианство [3].

В этом русле возникла идеалистическая (а также даже позитивистская) философия, которая рассматривает наши восприятия, наши наблюдения как более надежную и определенную действительность, нежели физическая реальность (как полагает позитивизм, последняя – просто наша мысленная конструкция).

Мы обязаны Канту, предпринявшему первую грандиозную попытку соединить реалистическую интерпретацию естественных наук с прозрением, что наши научные теории – не просто результаты описания природы или непредубежденного прочтения "книги природы", но продукты нашего ума. "Рассудок не черпает свои законы из природы, а предписывает их ей" [4]. Попытаюсь следующим образом улучшить эту превосходную формулировку: "рассудок не черпает свои законы из природы, а пытается – с тем или иным успехом – предписать природе законы, которые он свободно изобретает" [5].

Эпистемологические идеалисты ясно увидели тот факт, что теории – наши собственные изобретения, наши идеи. Однако некоторые из теорий настолько смелы, что сталкиваются с реальностью. Это проверяемые научные теории. Когда теория сталкивается с реальностью, мы узнаем, что эта реальность существует: существует нечто, что информирует нас, что наши идеи ошибочные. Вот почему реалист прав.

(Кстати, на мой взгляд, реальность может дать только такого рода ин-

формацию – информацию о том, что теория отвергается. Все остальное – наше собственное изобретение. Вот почему все наши теории, будучи окрашены нашей человеческой точкой зрения, по мере продвижения нашего исследования все менее искажаются ее присутствием.)

На этом закончим – про реализм, про научный реализм, "про критический реализм".

Неверно, что "научный реализм" исходит из предположения, согласно которому наши научные теории базируются на том, что мы действительно можем наблюдать, т.е. на информации, на "данных", даваемых нам реальностью. Такого рода представление, недвусмысленно отвергнутое Эйнштейном в 1933 г. [6], остается достаточно популярным даже среди физиков-теоретиков. Оно ведет к субъективистской (позитивистской, идеалистической и солипсистской) интерпретации науки.

II

Вторая причина распространения субъективизма связана с возникновением *вероятностной физики*, которая впервые приобрела фундаментальное значение в теории материи Максвелла и Больцмана. Они, конечно же, имели многих знаменитых предшественников.

Эта новая вероятностная физика в течение долгого времени соотносилась с нашим недостаточным знанием (lack of knowledge) [7]. Даже в 30-х годах и возможно позже думали, что вероятность входит в физику только потому, что мы не имеем возможности знать точные координаты и импульсы всех молекул газа. Это вынуждает нас приписывать вероятности различным возможностям, т.е. действовать по методу, лежащему в основании статистической механики. Если бы мы смогли узнать, если бы мы были уверены, что знаем все координаты и импульсы рассматриваемых частиц, нам не надо было бы отдавать себя на милость вероятности.

Таким образом, была установлена прямая связь между недостаточностью знания, с одной стороны, и вероятностной или статистической физикой – с другой.

Вплоть до 1939 г. и даже после на этой связи настаивали почти все ученые. Эйнштейн, например, защищал ее от моей критики, содержащейся в "Логике научного открытия" (ЛНО), но снял свои возражения, когда мы беседовали в 1950 г. [8].

Можно показать, что точка зрения субъективной недостаточности знания, состояния нашей неопределенности была доминирующей, по крайней мере, при ранней интерпретации Гейзенбергом тех формул, которые он назвал соотношениями неопределенностей и которые, как он думал, объясняют, почему квантовая механика имеет статистический характер. (Сравните с тем, что сказано по этому поводу в ЛНО, разд. 75.)

Я думаю, что история оставляет мало сомнения в том, что проникновение субъективизма в физику объясняется указанными двумя великими ошибками. Вместе они вели к позитивистскому (идеалистическому, субъективистскому) отвержению реализма, отвержению, мотивированному верой в то, что статистическая физика *фундаментально и неизбежно коренится в фундаментальности и неизбежности границ нашего (субъективного) знания* – границ (соотношений неопределенностей), которые, хотя и сами по себе объективны, но все же являются границами того, что может познать субъект.

Следует признать, что с течением времени вера в объективность этих границ привела к сдвигу: на роль вероятности теперь смотрят по-другому. Квантовая физика стала трактоваться как объективно индетерминистическая, а вероятность – как нечто объективное (как я показывал в ЛНО).

Однако согласно тому взгляду на историю, который предлагается мною, субъективистская догма к этому времени слишком прочно укоренилась среди тех, кто разрабатывал ведущую интерпретацию квантовой механики, а именно – копенгагенскую интерпретацию, и даже отдельные замечания Гейзенберга об объективных возможностях (под которыми он понимал нечто весьма близкое к моим предрасположенностям) не только не удаляли субъекта – наблюдателя из копенгагенской интерпретации, но и не имели ввиду такое удаление.

Я кратко представил здесь эту историю, ибо она объясняет, с чего нача-

лась великая квантовая путаница, почему гейзенберговские так называемые "соотношения неопределенностей" в течение долгого времени интерпретировались как границы нашего субъективного знания (а не как объективные статистические "соотношения рассеяния", которые я предложил еще в 1934 г. в ЛНО, чтобы заменить интерпретацию Гейзенберга), и почему даже тогда, когда их объективная сторона вышла на сцену, они все еще интерпретировались как положения о невозможности некоторых измерений *ввиду отсутствия измеряемых сущностей*, – вместо трактовки их как утверждений о невозможности приготовления квантовых состояний с нулевым рассеянием (бездисперсных квантовых состояний).

Кроме того, вся терминология, введенная на раннем этапе становления квантовой теории, способствует тому, что путаница в ее интерпретации не только сохраняется, но и усиливается.

III

Другая причина современного кризиса в физике – упорная вера в полноту и окончательность квантовой механики. Именно неприятие этой веры лежит в основе моей решительной оппозиции копенгагенской интерпретации.

Копенгагенская интерпретация, или, более точно, – точка зрения Бора и Гейзенберга на статус квантовой механики, состояла попросту говоря, в утверждении, по которому квантовая механика стала последней, окончательной и никогда не могущей быть превзойденной революцией в физике. Кроме того, в ней содержался тезис, что истина о положении вещей в физике выводится из самой физики, точнее из соотношений неопределенностей Гейзенберга. Тем самым декларировалось, что *физика достигла конца своего пути* и что дальнейшие прорывы невозможны. При этом, конечно, не отрицается тот факт, что на пути разработки и применения квантовой механики еще много предстоит сделать, другими словами, предстоит продвижение по пути "нормальной науки", а не научной революции.

Едва ли мне надо специально оговаривать, что в 1930 г. я рассматривал (и

сейчас продолжаю рассматривать) научную революцию как характерное явление всей большой науки. Соответственно я восхищаюсь Бором и Гейзенбергом как революционерами в науке. Но я считал (и сейчас считаю) их эпистемологическое кредо скандальным. Вероятно сейчас многие забыли о том, в чем именно оно состояло.

Я думаю, что много действительно забылось. Во всяком случае никто об этом кредо не упоминает в нынешних дискуссиях о квантовой теории, хотя оно остается центральным в них (особенно если учесть, что Дж. Белл открыл путь к его экспериментальному исследованию).

Рассмотрим кратко историю вопроса.

Эйнштейн и те физики, которые оценили квантовую теорию как революционный прорыв, но тем не менее не признали ее окончательности или того, что я предлагаю назвать "тезисом окончания пути", верили в возможность следующего шага в глубину, шага за квантовую механику.

Эйнштейн долгое время отстаивал эту точку зрения, аргументируя (на мой взгляд ошибочно), что квантовая механика – вероятностная теория, а вероятность входит в физику исключительно по причине недостатка у нас знания (см. предыдущий раздел). Я же всегда рассматривал эту субъективистскую точку зрения на вероятность как ошибочную и думаю, что Эйнштейн отказался от нее (возможно окончательно) в течение нашей дискуссии в 1950 г. Однако даже тот, кто не согласится с Эйнштейном относительно той конкретной причины, которая заставила его отвергнуть тезис окончания пути, согласится с ним, что за уровнем физической реальности, описываемым уравнениями квантовой механики, возможен более глубокий ее уровень, расположенный, скажем, в ядерной физике.

Но не такова точка зрения Гейзенберга. Я провел вечер, беседуя с ним, когда он приезжал в Вену (кажется, это было в 1935 г.). В то время Гейзенберг полагал, что исследования в ядерной области не выведут квантовую механику на новый уровень глубины. Он предвидел, что скорее в них обнаружится еще большая неопределенность: скорее окажется, что пределы нашего знания в тео-

рии ядра более узкие, чем в теории атома (в теории электронной оболочки), и что структура и стабильность ядра скрыты от нас в еще большей степени, чем структура и стабильность электронной оболочки.

Сегодня уже ясно, что те, кто не верил в тезис окончания пути, были правы. Гейзенберг сам сделал шаг в область, запредельную с точки зрения этого тезиса. Более того, сейчас этот тезис выглядит настолько абсурдным, что как я полагаю, сегодня мало кто из физиков вообще поверит в то, что он когда-то функционировал или, уж если и функционировал, то пользовался серьезным доверием. Однако именно этот тезис конца пути стал той основой, на которой развернулась великая борьба титанов, дискуссия между Альбертом Эйнштейном и Нильсом Бором.

Общепризнанно, что Эйнштейн был побежден в этом споре. Истина, однако, в другом. Действительной темой дискуссии Эйнштейна и Бора было то, что они оба называли, отчасти сбивчиво и неотчетливо, проблемой полноты, т.е. *является ли квантовая механика полной*.

Термин "полный" использовался в этой дискуссии в нескольких смыслах, однако с самого ее начала этот термин был в своем основном содержании определенно нацелен на то, чтобы сформулировать проблему, *стала ли квантовая механика (по меньшей мере в принципе) последним словом физики*.

В этой связи важно напомнить, что Эйнштейн никогда не рассматривал какую-либо из революций, которую он произвел, в качестве *последней*. Свою собственную фотонную теорию и необходимость использовать ее вместе с волновой теорией света, т.е. то, что потом было названо корпускулярно-волновым дуализмом, он трактовал как временную меру, хотя фактически она вплотную подвела его к теории волн материи, к обобщению корпускулярно-волнового дуализма на теорию материи. Он трактовал свою специальную теорию относительности как неудовлетворительную (и вполне справедливо). Для этого у него были основания, в частности то, что она просто заменила абсолютное пространство абсолютным множеством инерциальных систем отсчета. Он называл общую теорию относительности эфемерной и с момента ее рождения и до кон-

ца своей жизни старался превзойти ее.

Другое дело – Бор и Гейзенберг. На Гейзенберга произвел грандиозное впечатление тот прорыв, который он произвел и который сопровождался у него интуитивным видением новой теории. Он заметил тогда для себя, что "важнейшим критерием истинности" является "простота законов природы, которая всегда светит нам в конце пути" [9].

Я думаю, что это великое переживание, видение "светоносной простоты" стало решающим для Гейзенберга. Он ощутил, что "это было *оно*", это было окончание пути, конечная истина. И это заставляло его негодовать на тех, кто не признавал, что это действительно окончание пути (особенно он негодовал на Эйнштейна). Гейзенберг использовал немецкое слово "endgültig". Английский перевод этого слова как "финально истинный (finally valid)" не передает то ощущение окончательного решения, которое передается немецким "endgültig". Именно стараясь передать это ощущение, я и ввел выражение "окончание пути".

В своем предисловии к переписке Эйнштейна и Борна (написанном вероятно в 1948 г.) Гейзенберг старается описать ситуацию, в которой Эйнштейн разошелся с самим Гейзенбергом, а также с его учителем Максом Борном. Гейзенберг писал, что "Эйнштейн соглашался с Бором в том, что ... математический формализм квантовой механики правильно представляет явления, имеющие места в электронной оболочке атома". Он, однако, сожалел, что "Эйнштейн не хотел признать, что квантовая механика представляет финально истинное или даже, менее того, полное описание этих явлений" [10]. Здесь, я думаю, "финально истинное" (endgültig) следует переводить как "окончательно истинное" – как то, "что достигается в конце пути".

Когда Гейзенберг писал это, он вряд ли сознавал, что Эйнштейн гораздо более критично относился к собственным теориям, чем к теориям Гейзенберга.

Сходную заметку об этом конфликте можно найти в томе воспоминаний "Werner Heisenberg" [11]. Фон Вейцзекер, близкий друг и сотрудник Гейзенберга, пишет (с. 66), что Эйнштейн полагал, что квантовая механика не составляет

еще "die endgültige Physik" (окончательно истинной физики, конца пути в физической науке). Критический подход Эйнштейна представлен здесь как свидетельство его не вполне удовлетворительного понимания, его старомодности, ведущей к утрате контакта с квантовой механикой.

Прежде чем оставить Гейзенберга и его вполне объяснимый подход к квантовой механике, стоит упомянуть, что его взгляды сильно менялись. Но именно Гейзенберг вел целое поколение физиков к принятию абсурдной позиции, согласно которой квантовая механика учит, что "объективная реальность испарилась" [12]. Нильс Бор, рассмотренный в данном контексте, во многом иной.

Когда я в 1936 г. благодаря Виктору Вайскопфу впервые получил возможность поговорить с ним, он произвел на меня впечатление самой удивительной личности из тех, кого я когда-либо встречал и вообще мог бы встретить. Он был всем тем, чем мог быть великий и хороший человек. И он был неопровержимо доказателен. Я чувствовал, что я, должно быть, не прав в отношении квантовой механики. И это учитывая, что я и сейчас понимаю ее не так, как Н. Бор. Однако что-то во мне изменилось.

Подход Бора к квантовой механике, на мой взгляд, весьма отличен от подхода Гейзенберга. Я полагаю, что Бор в основаниях своих суждений был реалистом. Квантовая теория была для него изначально загадочной. Никто, как он, не сознавал так остро всей глубины трудностей, окружающих его модель атома, выдвинутую в 1913 г. Он никогда не отделался от этих трудностей. Во всех его удивительных победах присутствовал элемент неудачи. Нечто не постижимое, непроницаемое не позволяло ему достигнуть ясности. Возможно он никогда не испытал того удовлетворения, которое испытал Гейзенберг, вкусив всеосвещающую вспышку. Принимая квантовую механику как окончание пути, Н. Бор испытывал что-то вроде отчаяния: только классическая физика понимаема, только она описание реальности. Квантовая механика не описывает реальность. Достичь такого описания в атомной области невозможно может быть потому, что такой реальности просто не существует. Понимаемая реальность

оканчивается там, где оканчивается классическая физика. Ближайшее приближение к пониманию атомных явлений дает его принцип дополнительности.

Этот принцип говорил нечто о пределах классической физики и таким образом понимания. Нам доступны классические частицы и классические волны, нам доступно и то, что корпускулярное описание и волновое описание несовместны. Оба эти способа описания необходимы, хотя и несовместимы. Этим очерчивается предел, до которого может распространяться наше понимание. Это окончание пути, но в совершенно ином смысле слова, чем гейзенберговский (хотя как Бор, так и Гейзенберг соглашались в том, что наше понимание мира требует обновления).

Однако отстаиваемая Н. Бором идея связи принципа дополнительности с "корпускулярно-волновым дуализмом" не получила поддержки после того, как была принята интерпретация, предложенная М. Борном, квадрата модуля волновой функции как вероятности обнаружения соответствующей частицы. Это означало фактически, что корпускулярная интерпретация стала фундаментальной. С этого момента в копенгагенском лагере воцарился хаос. Мюррей Гелл-Манн, один из немногих физиков, кто осмеливался критиковать Бора, вероятно слишком грубо выразил это, сказав, что "после того промывания мозгов, которое устроил физикам Нильс Бор, целое поколение теоретиков стало полагать, что дело (т.е. адекватное философское истолкование квантовой механики) было сделано 50 лет тому назад" [13]. Я лично думаю, что подавляющее большинство физиков, включая теоретиков, просто мало утруждало себя этой проблемой, полагаясь на Бора в тех вопросах, где они не чувствовали себя компетентными.

Бор поддерживал тезис окончания пути в ходе его великой дискуссии с Эйнштейном. О том, что этот тезис был в центре их дискуссии, сейчас забыли, но это становится ясным из знаменитой статьи Эйнштейна, Подольского и Розена [14].

IV

Однако еще до появления этой статьи, в 1932 г. была опубликована книга И. фон Неймана "Die mathematische Grundlagen der Quantenmechanik" (Матема-

тические основание квантовой механики), книга очень трудная (по крайней мере для меня). В этой книге фон Нейман дал математическое доказательство, призванное раз и навсегда установить финальный характер квантовой механики, показать, что в этой теории достигнута конечная цель физического исследования. Он доказывал, что ошибались все те, кто, подобно Эйнштейну, полагал, что за слоем физической реальности, представленным квантовой механикой, лежит более глубокий слой.

Чтобы сделать свое доказательство совершенно общим, фон Нейман ввел ставшее впоследствии знаменитым понятие "скрытых переменных". "Скрытая переменная" – это все, что должна учитывать атомная теория (конечно же, включающая теорию атомного ядра), но не принимается во внимание квантовой механикой. Фон Нейман доказал (или мы считаем, что доказал), что скрытые параметры невозможны в квантовой механике, или, иными словами, доказал, что существование "скрытых переменных" противоречит квантовой механике.

Однако так случилось, что в год публикации его книги были открыты две новые частицы: нейтрон и позитрон.

Не были ли они до открытия "скрытыми переменными"? Если нет, то чем они были?

В конце концов, квантовая механика – не абстрактный физический формализм, а теория чего-то очень конкретного: атомов, их структуры, состоящей из положительно заряженного ядра и оболочки из отрицательно заряженных электронов. Квантовая механика объясняет, по крайней мере в принципе, весьма конкретные свойства химических элементов.

В 1931 г. еще предполагали, что атом состоит только из *двух* материальных частиц – электрона и протона. Кроме того, предполагалась, конечно, нематериальная частица – фотон. Все атомные структуры объяснялись в этих терминах, причем атомные ядра также строились из них, правда, принцип этого построения оставался неизвестным.

Но уже в 1932 г. были открыты позитрон и нейтрон. В 1933 г. Паули об-

народовал на Сольвеевской конференции в Брюсселе свою идею существования другой частицы, для которой Ферми предложил название "нейтрино".

Имеет смысл кратко обсудить причины, по которым ведущие физики не увидели в этих открытиях опровержения их установки считать квантовую механику в соответствии, скажем, с формулировкой фон Неймана, конечным пунктом пути физического познания (endgültig) и полной теорией (vollständig).

(а) Позитрон. Имеются основания утверждать, что открытие позитрона было на первых порах весьма неохотно воспринято Бором, Гейзенбергом, Шредингером, а также Эддингтоном. Однако, когда стало ясно, что это открытие не может быть опровергнуто, оно, думаю справедливо, было объявлено успехом квантовой механики в той форме, в которой эта теория была изложена Дираком. Ибо действительно Дирак получил, исходя из своей теории, предсказание существования положительно заряженной частицы. Он полагал, что его предсказание относится к протону. Но оно лучше соответствовало позитрону. Так что возникло хорошее основание объявить, что позитрон не только не опровергает квантовую механику, но, наоборот, подтверждает ее [15].

(б) Чадвик со своим нейтроном доставил меньше хлопот. Нейтрон мог бы рассматриваться как состоящий из протона и электрона. Оказалось, однако, что возникает серьезная трудность: теория – квантовая механика – не справляется с объяснением такого строения нейтрона. Пришлось принять существование новой частицы, которая вероятно возникает либо в процессе совместного перехода протона и электрона в нейтрон, либо при эмиссии позитрона из протона. (Было интересно прочитать в одной из недавних статей Р.М. Сантilli, что эта "первая структурная модель нейтрона" оживает в его теории "разрешающей те технические проблемы, которые в свое время привели к отказу от этой модели" [16].)

Автор говорит, что "все трудности возникали из-за предпосылки, согласно которой атомная механика" (так Сантilli именуется квантовую механику) применима в пределах нейтрона, и что эти трудности исчезли, когда стала использоваться обобщенная механика.

(в) Вполне понятно, что люди, верящие в окончание пути (а к таковым тогда принадлежал Паули), уже не были поражены открытием нейтрино (правда, нейтрино тогда, по сути дела, не было еще открыто – тогда это была чисто спекулятивная частица), хотя открытие должно было бы рассматриваться как еще одна "скрытая переменная". Сейчас, однако, они неосознанно изменили свою позицию, в том числе и свое представление о скрытых переменных. Первоначально под названием "квантовая механика" выступала теория атома (включая атомное ядро, *само собой разумеется*). Особенно это было ясно в контексте дискуссии Бора, Гейзенберга и других с Эйнштейном. Теперь же главным образом благодаря Гейзенбергу, Борну, Йордану, Шредингеру, а также Дираку, Гордону, Клейну имя квантовой механики становится просто названием высокоэффективного математического формализма, причем формализма, который, возникнув в качестве теории движения отрицательного электрона в поле положительного ядра, находит все более и более широкое применение. Этот формализм, однако, очень сильно изменился и шагнул далеко за пределы первоначальной теории Гейзенберга, Борна и Йордана – теории, трактовавшейся как осуществленная цель физики.

(г) После того как в 1935 г. Юкава предсказал новую частицу, позднее названную мезоном, ее поиск привел к открытию нескольких разных мезонов. Но ни одна из этих частиц, как и многие другие элементарные частицы, не рассматривалась в виде того, что раньше обозначалось как "скрытая переменная". Причем это продолжалось и после того, как "скрытые переменные" освободились от первоначального постулата фон Неймана, по которому их роль – восстановление детерминизма в теории, постулата, который некоторые, включая меня, с самого начала рассматривали как невыполнимый.

Тем временем квантовая механика разрослась. Но ее название более или менее сохраняют, поскольку эта теория сохранила ряд характерных принципов (соотношения коммутации, соотношения неопределенностей Гейзенберга, принцип запрета Паули). В итоге оно применяется к квантовой электродинамике, квантовой теории поля и даже к квантовой хромодинамике и к теориям,

вводящим новые квантовые числа, т.е. то, что раньше называлось "скрытыми переменными". Таким образом, защита Бором тезиса о полноте квантовой механики (т.е. тезиса окончания пути) в его полемике с Эйнштейном осталась в силе и после того, как сама теория радикально изменилась, а ее неполнота стала слишком очевидной, чтобы быть предметом крупных интеллектуальных столкновений.

Возможно теория изменилась не в том направлении, на которое надеялся Эйнштейн. Но не в этом состоял главный предмет его полемики: Эйнштейн никогда не был догматически настроен даже в отношении тех теорий, которые он решительно поддерживал.

Догматизм был инкриминирован ему теми, кто вроде Гейзенберга (в цитированном выше пассаже из предисловия к переписке Эйнштейна и Бора) настаивал на тезисе окончательности квантовой механики и после того, как новые и, по-видимому, уже не столь приветствуемые революции показали, что до конца еще далеко.

Выше я упоминал Сантилли и хочу сказать, что он – один из представителей нового поколения – движется в ином направлении. Я весьма далек от того, чтобы преуменьшать вклад гигантов, создававших квантовую механику – Планка, Эйнштейна, Бора, Борна, Гейзенберга, де Бройля, Шредингера, Дирака. Высоко оценивает работу этих людей и Сантилли. Однако, что характерно, он отличает область "бесспорной приложимости" квантовой механики (он называет ее атомной механикой) от *ядерной механики и адроники*, и его самый привлекательный аргумент в поддержку того, что квантовая механика не может без новых проверок считаться истинной в области ядерной механики и адроники, состоит, как мне кажется, в призыве вернуться к здравому смыслу – к реализму и объективизму, которые отстаивал Эйнштейн и которые были отвергнуты двумя другими великими физиками – Гейзенбергом и Бором.

Таковы предпосылки, позволяющие понять современную ситуацию в физике. Правда, возникли новые моменты: например в работах Дж. Белла (я их рассмотрю ниже). Однако даже работы Белла через аргумент Эйнштейна, Подольского и Розена напрямую связаны с проблемами реализма, вероятности, полноты и финальности. Сам же этот аргумент в его первоначальной форме был направлен против характерной для копенгагенской интерпретации оппозиции реализму.

Действительно, за последнее десятилетие появились новые захватывающие результаты, касающиеся основ квантовой теории. Они связаны со знаменитым мысленным экспериментом (1935) Эйнштейна, Подольского и Розена (далее ЭПР). Эйнштейн придумал этот эксперимент вскоре после того, как я попытался предложить аналогичный эксперимент. Однако мой мысленный эксперимент, материал по которому я опубликовал в "Naturwissenschaften" и в "Logik der Forschung" в 1934 г., был несостоятелен. Поскольку я действовал сходным, правда, к сожалению, ошибочным образом, стоит наверное упомянуть, что я был одним из первых философов, осознавших значимость ЭПР, и всегда очень интересовался этим мысленным экспериментом. Среди физиков он был популярен с самого начала, однако философы игнорировали его. Именно аргумент ЭПР привел к новым результатам, касающимся основ квантовой теории, в частности к тому, что называется неравенством Белла и проблемой нелокальности [17].

Следует различать два этапа в той концептуальной эволюции, которая привела к современному положению дел. На первом этапе появилась сама статья ЭПР, написанная *против* действия на расстоянии. Эта статья сделала впервые ясным то, что копенгагенская интерпретация ведет к признанию действия на расстоянии, причем даже на очень большом расстоянии.

Второй этап связан с именем Давида Бома [18]. Здесь возник ряд новых моментов. Аргументация Бома основывается на *поляризации* или спине. В исходной версии ЭПР спин не играл роли, но в версии Бома он приобрел решающее значение. Исходная версия ЭПР была чисто мысленным аргументом, сна-

чала казалось, что соответствующий реальный эксперимент невозможен. Бомовская же версия оказалась экспериментально проверяемой.

VI

Исходная версия ЭПР аргумента была, в сущности, направлена против интерпретации Гейзенбергом так называемых "соотношений неопределенностей", сформулировавшим эти соотношения, т.е. против той интерпретации формулы

$$\Delta p_x \Delta q_x \geq \hbar/2\pi, \quad (1)$$

которая была предложена Гейзенбергом. Данная формула устанавливает, что два интервала или диапазона – в данном случае интервал Δp_x проекции импульса вдоль оси x и интервал Δq_x пространственной координаты на оси x – связаны таким образом, что их произведение не может быть меньше, чем постоянная Планка, деленная на 2π . Это означает, разумеется, что чем меньшим мы делаем Δp_x , тем большим становится Δq_x , и *vice versa*.

Формула такого рода характерна для любой волновой теории. Она, например, возникает, если волновая теория света прилагается к ситуации, когда луч света, распространяющийся вдоль оси x падает на экран с узкой щелью.

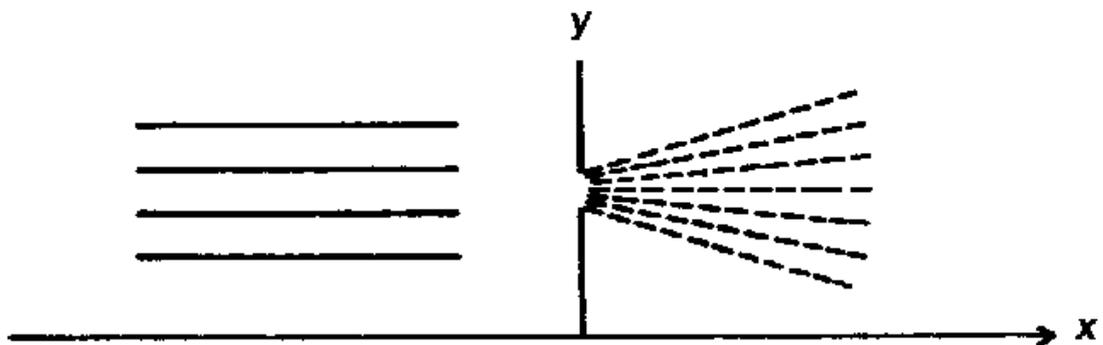


Рис. 1

Чем уже щель Δq_x , тем больше будет после прохождения луча через щель угол рассеяния импульса этого луча в направлении y . (Аналогичный результат получается из шредингеровской волновой теории электронов.)

Формула (1) может быть получена, например, путем применения волнового уравнения к описанной физической ситуации. Это говорит о том, что формула нуждается в *интерпретации*: она возникает из теории, когда теория прилагается к таким опытам, как опыт с лучом, падающим на экран с узкой щелью, а также к сходным опытам.

Согласно Гейзенбергу и копенгагенской интерпретации, дело здесь в проблеме, которая возникает при *всяком измерении*, так что формула (1) справедлива для *всех измерений* некоммутирующих пар переменных и для всех элементарных частиц, скажем протонов, электронов.

На первых порах она не рассматривалась как часть формализма самого по себе (таковой частью, например, считалось уравнение Шредингера). Она выводилась Гейзенбергом путем приложения формализма к небольшому числу таких физических ситуаций, которые могут быть представлены как *измерения*.

Гейзенберг пытался *объяснить* ограничения, которые его интерпретация накладывает на все возможные измерения, указывая, что если мы измеряем элементарную частицу, мы возмущаем ее или воздействуем на нее.

Эта ранняя интерпретация предполагала, что частица *имеет* отчетливо фиксируемое положение *и* импульс, но мы никогда не можем их точно измерить из-за нашего взаимодействия с ней. Эта интерпретация изменилась после того, как Шредингер предположил, что частица может быть представлена волновым пакетом и может в действительности *быть* таким пакетом [19].

Аргумент Эйнштейна, Подольского и Розена может трактоваться как направленный против (а) представления о том, что частица не может *обладать* в одно и то же время точной координатой и точным импульсом, (б) представления о том, что *всякое* измерение координаты должно возмущать импульс частицы и *vice versa*. Рассмотренный очень кратко, он представляет собой следующее [20].

Представим себе составную систему, описываемую уравнением Шредингера и состоящую, скажем, из двух частиц *A* и *B*, которые предварительно соударялись друг с другом. После соударения они разлетаются в разные стороны, и над одной из частиц, скажем *A*, проводится измерение. Мы можем выбирать,

какое свойство подлежит измерению, например, измерять координату или импульс. Если измеряется координата A , то результат измерения вместе с ψ -функцией составной системы позволяет найти координату B . Если измеряется импульс A , то аналогичным образом можно определить импульс B . "Квантовая механика, – пишет Эйнштейн, – дает нам тогда (т.е. после измерения над A) ψ -функцию для подсистемы B , и мы получаем *разные ψ -функции, которые различаются выбранным способом измерения системы A* " [21]. Частицу B можно тем временем поместить, скажем, на Сириус. Иными словами, в противоположность тому, что заявляет копенгагенская интерпретация, мы имеем возможность измерять координату или импульс B , не возмущая эту систему (возмущая только подсистему A).

В самом деле, B слишком удалена, чтобы на нее можно было бы воздействовать. В ЭПР аргументе *предполагается*, что дальное действие невозможно (что следует из специальной теории относительности). Это предположение позднее было названо "принципом локальности" и "принципом локального действия". Исходя из факта, что мы можем определить координату и импульс частицы B , не измеряя их непосредственно (проводя измерения только над A), Эйнштейн заключил, что частица B обладает одновременно как координатой, так и импульсом, и что при каждом из двух решений – измерять либо координату, либо импульс – квантовая механика даст нам о B неполную информацию. Причем ограниченность возможной информации о B не вытекает из нашего возмущения B – ведь мы не воздействуем на B . Измеряя импульс A (и воздействуя на A), мы возмущаем ее координату, измеряя координату A (и воздействуя на A), мы возмущаем ее импульс. Однако мы не можем воздействовать также на B , которая может находиться на расстоянии нескольких световых лет от A и, стало быть, никак не затрагиваться теми измерениями, которые производятся над A (если, разумеется, не принимается дальное действие, мгновенное действие, распространяющееся со скоростью, большей световой, ибо измерение над A дает нам информацию о B в тот же момент времени, в который мы проводим это измерение).

Согласно принципу локальности, удаленные друг от друга и невзаимодействующие объекты независимы. Таким образом, независимо от "акта наблюдения" B должна обладать некой объективной реальностью и одновременно иметь точную координату и точный импульс, хотя мы и не можем их узнавать одновременно.

(В скобках я бы добавил, что статья ЭПР несмотря на всю свою важность, на мой взгляд, имеет несколько дефектов, затрудняющих обсуждение изложенной выше проблемы. В ней слишком много внимания уделено вопросу о том, что мы должны называть *реальным*, а также вопросу, касающемуся полноты квантовой механики, – вопросу, отвлекающему от главного, ибо обсуждая его, забывают стоящий за ним тезис окончания пути. Каждая физическая теория неполна в нескольких смыслах этого слова, и неполнота квантовой механики очевидна, так как эта теория не позволяет, например, проследить соотношение между абсолютными значениями физических констант e , c и h .)

В статье ЭПР наиболее важны следующие два вопроса: (1) правильна ли гейзенберговская (и подобные ей) интерпретации, а именно – может ли неопределенность быть объяснена ссылкой на вмешательство наблюдателя в дела наблюдаемого объекта, и (2) существует ли действие на расстоянии. Можно ли, делая что-то с A , наблюдая или измеряя, воздействовать на B , которая может быть удалена на расстояние в несколько световых лет от A ?

Как отмечалось выше, в настоящее время действие на расстоянии исключено эйнштейновской специальной теорией относительности, которая, кстати, имеет хорошее экспериментальное подкрепление. Специальная теория относительности предполагает принцип локальности. Если бы действие на расстоянии (даже действие, не способное служить сигналом [22]) существовало, то специальная теория относительности нуждалась бы в соответствующей коррекции. (Фактически мы должны были бы вернуться к интерпретации формализма специальной теории относительности, выдвинутой Лоренцем, – мы обсудим это ниже). Ни Эйнштейн, ни Бор (ни Гейзенберг) никогда не предполагали, что от принципа локальности нужно отказаться. И я полагаю, что если бы Бор столк-

нулся с теоретическими результатами, предполагающими, что квантовая теория ведет к нарушению локальности, он бы рассматривал их как весьма сильный аргумент против квантовой теории и возможно даже как ее опровержение [23].

Это становится ясным при знакомстве с материалами малоизвестной дискуссии между Эйнштейном и Бором, опубликованными в 1948 г. в "Dialectica" [24]. В своей статье Эйнштейн выдвигает весьма умеренный и простой аргумент против копенгагенской интерпретации квантовой механики. Во-первых, он формулирует то, что теперь называют принципом локальности, т.е. принцип исключения действия на расстоянии, называя его принципом действия на исчезающе малых расстояниях или Prinzip der Nahewirkung. Затем он отмечает, что принципы квантовой механики, по крайней мере в ее копенгагенской интерпретации, несовместимы с принципом локальности и что в случае истинности квантовой механики, которая утверждается Бором, в природе должно существовать действие на расстоянии.

"Мне кажется, – продолжает Эйнштейн, – не подлежит сомнению, что физики, которые считают квантовомеханический способ описания принципиально окончательным, будут на эти соображения реагировать следующим образом: они откажутся от требования ... о независимом существовании имеющихся в различных областях пространства физических реальностей, они могут с полным правом ссылаться на то, что квантовая механика нигде в явном виде не применяет это требование".

Эйнштейн таким образом непосредственно фиксирует, что принцип локальности не относится к явным тезисам квантовой механики. Он, однако, просит нас иметь в виду, что когда он рассматривает все известные ему физические явления и особенно те, которые успешно описываются квантовой механикой, он нигде не находит ни одного физического факта, который сделал бы для него весьма вероятным то, что принцип локальности должен нарушаться. "Во всяком случае, – заключает Эйнштейн, – нужно, по-моему мнению, остерегаться того, что при отыскании единой основы для всей физики догматически опираться (dogmatisch festlegen) на схему современной теории".

Если мы вникнем в ответ Бора на статью Эйнштейна (этот ответ был написан после эйнштейновской статьи – Бор писал его, положив перед собой эйнштейновскую статью, но ответ был опубликован Паули перед этой статьей) или в редакционное предисловие, написанное Паули, то нам станет ясно, что ни один из них не полагал, что Эйнштейн правильно интерпретирует квантовую механику, считая, что она ведет к действию на расстоянии. Паули отвергает как "лишенное смысла" любое утверждение об одновременных значениях "наблюдаемых", для которых в гильбертовом пространстве не существует возможных векторов, по-видимому, полагая, что тем самым он дал убедительный ответ Эйнштейну. Читая ответ Бора, приходишь к выводу, что он, возражая Эйнштейну, нигде не допускает, что квантовая механика ведет к признанию действия на расстоянии.

VII

За последнее десятилетие все казалось бы изменилось. Многие современные физики сказали бы, что то, что мы могли бы назвать альтернативой Эйнштейна, – либо квантовая механика, либо локальность – действительно имеет смысле (хотя они, по-видимому, не знают, что эта альтернатива была очерчена Эйнштейном). Отсюда следует, что аргумент Бора против Эйнштейна был неверен и даже внутренне противоречив. Тем не менее *эти физики думают, что Эйнштейн был не прав, поддерживая принцип локальности, а боровская антиреалистическая философия была верна.*

Этот новый подход коренится в той переформулировке ЭПР аргумента в терминах спина, которая была дана Д. Бомом. Бомовская версия этого аргумента, которая, на мой взгляд, очень сильно отличается от первоначальной ЭПР, берет в рассмотрение две частицы, чьи спины взаимодействуют. После этого измеряют спин одной из них и тем самым определяют спин другой. Измеряя различные компоненты спина, скажем A , мы определяем соответствующие компоненты спина B [25].

Остановлюсь на некоторых различиях между исходным ЭПР аргументом

и его бомовской версией. Эти различия связаны с особенностями двух способов приготовления квантово-механического состояния [26]. Это приготовление может быть просто селективным, а может, кроме того, создавать новые предрасположенности (propensities) – как в случае отбора состояния частицы при помощи поляризатора (например, призмы Николя или кристалла турмалина). Первое приготовление связано либо с обычным ретросказательным измерительным экспериментом, либо с тем видом приготовления, которое я называю "физической селекцией" [27]. Бомовская (и, следовательно, также белловская) версия ЭПР эксперимента представляет собой, однако, селекцию во втором смысле этого слова: этот эксперимент базируется на измерении поляризации, которое придает новые предрасположенности рассматриваемым частицам. Не исключено поэтому, что этот эксперимент будет сильно отличаться от эксперимента с другим типом приготовления состояния. Не исключено, что ЭПР эксперимент в бомовско-белловской версии свидетельствует в отличие от первоначального варианта в пользу действия на расстоянии, следовательно, не в пользу специальной теории относительности. Если это действительно так, то перед нами возникает новое и очень интересное различие двух видов селекции или приготовления состояния.

Заметим, что в связи со спином возникают другие проблемы. Во-первых, мы так мало знаем о спине, что не исключено, что Бом ошибался, предполагая, что его спиновая версия ЭПР эквивалентна предложенной Эйнштейном. Говоря это, я имею в виду то, что у нас нет реалистической теории спина. Спин, присутствующий в теории атома, отличается от того, что мы обычно реалистически называем спином. Спин – это что-то очень странное и в *некотором смысле* слова неклассическое. Возможно в связи со спином действительно имеет место действие на расстоянии (см. ниже). Но это не значит, что на неограниченно большом расстоянии. Между прочим, фактор большого расстояния имел решающее значение для оригинальной версии ЭПР. В результате, если будет доказано дальное действие для малых протяженностей, это еще не будет аргументом против исходной версии ЭПР, а только против бомовской его версии. Не

исключено, что аргумент со спином в конечном итоге не окажет существенной помощи копенгагенской интерпретации. Новые эксперименты типа ЭПР экспериментов спасли бы копенгагенскую интерпретацию лишь в том случае, если бы нелокальное действие распространялось на любые расстояния. (Кстати, даже сейчас редко осознают необходимость различать формализм квантовой теории от ее копенгагенской интерпретации.)

Пока речь шла о возможном. Однако ЭПР эксперимент, сформулированный в терминах спина, не просто мысленный эксперимент, он может быть реально выполнен. Теоретическая основа такого эксперимента была разработана Дж. Беллом, и ряд экспериментов был выполнен. (Мои настоящие замечания базируются на предположении, что белловская *интерпретация* его теоремы физически корректна; это, однако, открытый вопрос.)

Указанные проверки предполагают проверку того, что теперь называется неравенством Белла. Хотя окончательные выводы делать рано, большинство экспериментов, по-видимому, свидетельствуют против того, что Белл назвал "локальными реалистическими теориями", и в пользу квантовой механики и возможно даже ее копенгагенской интерпретации.

Признаюсь, эти результаты удивили меня. Когда я в первый раз услышал, что Ф. Клаузер и А. Шимони намереваются проверить неравенство Белла, я предположил, что в результате квантовая теория будет опровергнута. Однако мое ожидание оказалось ошибочным, поскольку большинство проверок свидетельствовало о другом.

VIII

Тем не менее я не отказываюсь от моей реалистической интерпретации физики и пока не отказываюсь даже от локальности. Напротив, в отличие от А. Шимони я считаю, что нет ни малейшего повода полагать, что новейшие эксперименты, даже если бы их результат показывал, что от локальности следует отказаться, навредили реализму. Скорее (я это объясню в следующем разделе) этот результат, если он действительно справедлив, свидетельствует против

эйнштейновской и в пользу лоренцевской интерпретации формализма в специальной теории относительности, а также в пользу ньютоновского абсолютного пространства (Ньютон и Лоренц были, конечно же, реалистами).

Вышеупомянутые эксперименты, основанные на теореме Белла, – фактически первые эксперименты, которые могут рассматриваться в качестве решающих с точки зрения выбора между теорией Лоренца и специальной теорией относительности, хотя они проводились с иной целью и, насколько я знаю, никто не утверждал, что они могут использоваться для того, чтобы решить, кто же прав – Эйнштейн или Лоренц.

Долгое время и совершенно независимо от ЭПР аргумента я говорил, что хотя представление об отсутствии действия на расстоянии во всех отношениях более удовлетворительно, чем идея действия на расстоянии (особенно с точки зрения реалиста), не следует полагать, что действие на расстоянии *априори* невозможно или что оно исключено реализмом.

Этот подход слегка отличается от подхода Эйнштейна, который говорил, что "существует одно допущение, которое мы, на мой взгляд, должны поддерживать при всех обстоятельствах: реальное положение вещей (состояние) системы S_2 не зависит от того, что проделывают с пространственно отдаленной от нее системой S_1 " [28]. Не думаю, что следовало бы легко отказываться от этого допущения, но вряд ли нужно стремиться сохранять его "при всех обстоятельствах". Нам надо быть готовыми к тому, чтобы где-то принять действие на расстоянии.

Но прежде чем отбросить такой интуитивно приемлемый принцип, как принцип локального действия, вся ситуация в целом должна быть проанализирована более глубоко и тщательно, чем это делалось до сих пор. Разумеется, действие на расстоянии несовместимо со специальной теорией относительности, точнее с эйнштейновской (в отличие от лоренцевской) интерпретацией этого формализма (я уже отмечал это). Действие на расстоянии, если бы оно было принято, потребовало бы значительной модификации специальной теории относительности, потребовало бы отбросить ее эйнштейновскую интерпрета-

цию. Не следует, однако, забывать, что с точки зрения общей теории относительности специальная теория относительности – лишь первое приближение.

В любом случае главное, что мне хочется сказать и что, как я полагаю, хотел сказать сам Эйнштейн, состоит в следующем. Обычно все происходит в мире по принципу локального действия и вопреки тому, что, как считается, дают эти эксперименты. Если принимается действие на расстоянии, то в мире наряду с нормальным допускается ненормальный ход событий. Это было бы сильным ударом по здравому смыслу. Но все представления здравого смысла, включая и это представление, всегда должны быть открыты для критики.

Однако не только здравый смысл конфликтует с этими экспериментами и с отрицанием локальности. С ними конфликтуют все наши астрономические знания и результаты технических приложений физики, ибо все они предполагают реальность времени и исключают действие на расстоянии. И что даже более важно – выводимые из этих экспериментов, а также из ситуации в атомной физике в целом идеалистические утверждения, в особенности теория, согласно которой течение времени – это субъективная иллюзия, находятся, как мне представляется, в глубоком конфликте с биологией и теорией эволюции.

Поэтому, до того как отвергнуть локальность, нам кроме указанных недавних экспериментов, которые, кстати, вызывают много вопросов, предстоит еще многое сделать. И подчеркнем снова, что их результаты вопреки многочисленным утверждениям не входят в противоречие с реализмом. За истекшие шестьдесят лет не без влияния махизма философы и физики слишком часто спешили поверить идеализму. Одна из задач настоящего тома Постскрипума – постараться проанализировать многие из прошлых аргументов в пользу идеализма, которые многие физики считают просто само собой разумеющимися, и показать их ошибочность.

IX

Мне хотелось бы предложить простой эксперимент, который можно рассматривать как обобщение аргумента Эйнштейна, Подольского и Розена [29]. ЭПР "мысленный эксперимент", в том виде как он был первоначально сформу-

лирован, – всего лишь аргумент, а не реальный эксперимент. Я хочу предложить решающий эксперимент, позволяющий *проверить*, достаточно ли только познания, чтобы возникла "неопределенность", а вместе с нею (как предполагает копенгагенская интерпретация) рассеяние значений сопряженных величин, или же за это рассеяние ответственна именно физическая ситуация.

У нас есть источник, скажем, позитроний, который испускает в противоположенных направлениях пары провзаимодействовавших частиц. Рассмотрим пары частиц, движущихся вдоль положительной и отрицательной осей к двум экранам со щелями A и B , ширину каждой из которых можно регулировать (рис. 2). Позади щелей по обе стороны расположены наборы счетчиков Гейгера, образующие полуокружности.

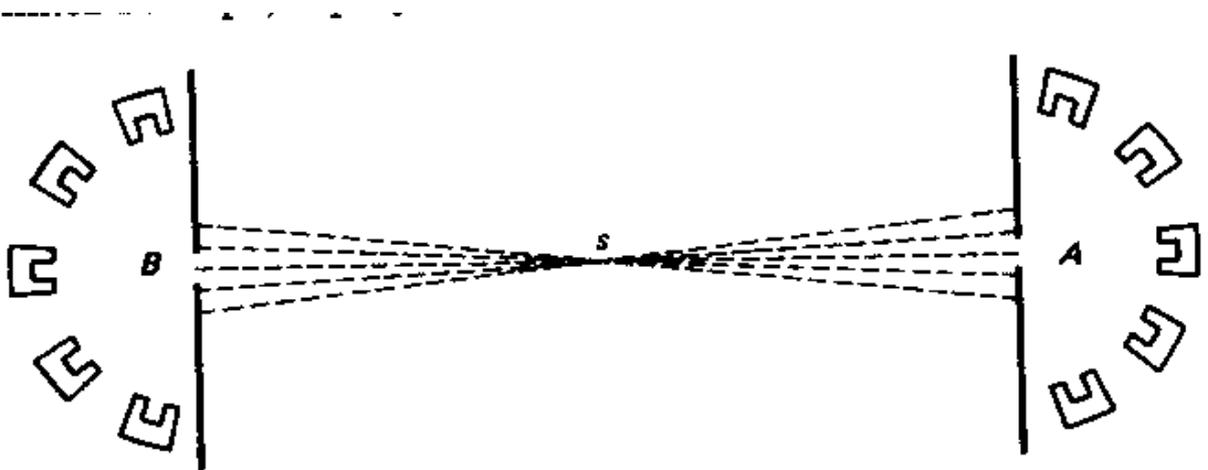


Рис. 2

Допустим, что интенсивность излучения испускаемых частиц очень низка, так что очень высока вероятность того, что две частицы, которые действительно прореагировали до испускания, будут зарегистрированы слева и справа одновременно.

Те из частиц, которые прошли сквозь щели A и B будут регистрироваться счетчиками Гейгера. Причем наши счетчики – счетчики совпадений: они связаны таким образом, что регистрируют лишь те частицы, которые одновременно проходят через A и B . Тем самым почти достоверно, что подсчитываются только пары провзаимодействовавших друг с другом частиц.

Теперь, делая щели A и B шире или уже, проверим гейзенберговский разброс для обоих пучков частиц (движущихся направо и налево). Если щели сужаются, то начинают работать счетчики, расположенные выше и ниже по отношению к щелям. То, что эти счетчики "вступили в игру", означает расширение угла рассеяния при сужении щелей в соответствии с гейзенберговскими соотношениями.

Сделаем щель A очень узкой, а щель B очень широкой. Согласно ЭПР аргументу, мы измерили q_y для обеих частиц (одна проходит через A , а вторая через B) с одинаковой точностью Δq_y щели A , поскольку мы теперь можем приблизительно с той же самой точностью рассчитать координату y частицы, которая проходит через B , хотя эта щель гораздо шире. Мы достигли таким образом достаточно точного "знания" координаты q_y этой частицы – косвенно измерили координату этой частицы по оси y . И поскольку, согласно копенгагенской интерпретации эта координата – наше *знание*, описываемое теорией и особенно соотношениями Гейзенберга, мы ожидаем, что импульс p_y пучка, приходящего через B , имеет такой же разброс значений, что и y пучка, проходящего через щель A , хотя она намного уже, чем щель B .

Однако рассеяние может быть, в принципе, проверено посредством установленных счетчиков. Если копенгагенская интерпретация верна, то такие счетчики, находящиеся за B и показывающие широкое рассеяние (и узкую щель), должны теперь подсчитывать совпадения: речь идет о счетчиках, которые до того, как щель A была сужена, не считали каких-либо частиц.

Подведем итог: если копенгагенская интерпретация верна, то любое возрастание точности просто *нашего знания* координаты q_y частиц, движущихся направо, должно увеличить их рассеяние, причем это предсказание должно быть проверяемым.

Я склонен предположить, что проверка покажет против копенгагенской интерпретации. Хотя отсюда будет следовать, что тезис Гейзенберга о том, что его формула применима ко всем видам косвенных измерений (тезис, который приверженцы копенгагенской интерпретации – такие как фон Нейман – твердо

считают частью квантовой механики), подорван, сама квантовая механика (например, формализм Шредингера) останется в неприкосновенности.

Какой же будет координата, если наш эксперимент (вопреки моему ожиданию) подтвердит копенгагенскую интерпретацию, т.е. если частицы, чьи координаты по оси y косвенно измерены в B , обнаружат возросшее рассеяние?

Это *могло бы* интерпретироваться как указание на действие на расстоянии, и если так, то нам придется отказаться от эйнштейновской интерпретации специальной теории относительности, т.е. вернуться к интерпретации Лоренца, а вместе с нею к ньютоновскому абсолютному пространству и времени. Мы не должны в таком случае отказываться от какой-либо формулы специальной теории относительности, ибо специальная относительность – интерпретация формализма, и тот же самый формализм может интерпретироваться либо как специальная теория относительности, либо как лоренцевское представление, согласно которому существуют абсолютные пространство и время, которые, однако, по причинам, зафиксированным в формализме, не могут быть обнаружены. Что же касается эйнштейновской интерпретации специальной теории относительности, то она утверждает, что одновременность не имеет абсолютного смысла, что если нет какого-либо способа обнаружить абсолютное пространство и время – когда это обнаружение действительно исключено формализмом, то не следует и допускать их существование.

В свое время, конечно, лоренцевская приверженность покоящемуся эфиру и ньютоновскому абсолютному пространству и времени выглядела несколько скандальной, а релятивистская интерпретация того же формализма была простой, элегантной и убедительной. С моей точки зрения, решающим аргументом в пользу эйнштейновской теории было то, что она показала возможность замены ньютоновской теории (которая была более успешна, чем какая-либо другая теория из когда-либо предлагавшихся теорий) альтернативной теорией с более широкой областью приложения, и так относящейся к ньютоновской теории, а также что каждый успех последней будет успехом и альтернативной теории, которая при этом корректирует и некоторые результаты ньюто-

новской теории. Указанное логическое отношение между этими двумя теориями, на мой взгляд, более существенно, нежели то, какая из них является лучшим приближением к истине.

Бор был, конечно же, страстным почитателем специальной теории относительности. Он, как и почти всякий в то время, хотел бы избежать ее опровержения. Если было бы показано, что такое опровержение необходимо, чтобы защитить квантовую механику, то это даже для Бора, по-видимому, означало бы, что квантовая механика опровергнута. Так что специальная теория относительности определила в какой-то степени тот стандарт, которому квантовая механика должна была соответствовать.

Однако только теперь новые эксперименты, проистекающие из работ Белла, создали ситуацию, в которой возможно предложение заменить эйнштейновскую интерпретацию на лоренцевскую. Если существует действие на расстоянии, то имеется что-то похожее на абсолютное пространство. Вспомним, что до сих пор при выборе между лоренцевской теорией и специальной теорией относительности ничего похожего на решающий эксперимент не проводилось. Если теперь из квантовой механики вытекают теоретические аргументы в пользу введения абсолютной одновременности, то они заставляют вернуться к лоренцевской интерпретации.

Х

Настоящий том Посткриптума посвящен главным образом физическим проблемам. Эти проблемы тем не менее одновременно подводят нас к тому, что я назвал "Метафизическим эпилогом", в котором очерчен представляющийся мне новым и обещающим путь рассмотрения физического космоса и особенно проблемы материи, путь, на котором, как я надеюсь, станет возможным разрешить трудности квантовой теории. Появление этого тома поэтому вызвано к жизни не столько проблемами микрофизической теории, которая важна сама по себе, сколько проблемами физической космологии [30].

Космологические размышления играют и всегда играли чрезвычайно

важную роль в развитии науки. Критически исследуя эти умозрительные теории, мы можем в значительной мере развить их, возможно до такой степени, что они будут допускать эмпирическую проверку. (Так поступили авторы теории стационарной расширяющейся вселенной, причем проверки привели к отвержению этой теории.) Многие космологические спекулятивные теории – в особенности в их начальных формулировках – не могут быть эмпирически проверены и фальсифицированы, поэтому я предпочитаю называть их скорее метафизическими, чем научными.

В этом томе я ввел термин "метафизические исследовательские программы", чтобы обозначить двойственный характер этих космологических теорий: их программный характер, формирующий и определяющий процесс научного исследования, их непроверяемость (по крайней мере на первых порах) и, стало быть, метафизичность.

В "Метафизическом эпилоге" настоящего тома я сказал немного об исследовательских программах вообще. Кроме того, я предложил реальную исследовательскую программу, применяемую к действительным проблемам физики и биологии и обеспечивающую их интерпретацию. По ходу введения моей метафизической исследовательской программы мне пришлось вникнуть в историю науки и реконструировать "ситуационную логику (logic of situation)", а именно отчетливо сформулировать последовательность проблемных ситуаций в физике (а затем и биологии) в терминах, в которых должны рассматриваться моя собственная метафизическая исследовательская программа, а также ее многие предшественницы и соперницы, для того чтобы быть понятыми, подвергнутыми критике и оцененными.

Где только не встретишь такие исследовательские программы! Они определяют или возникают из того, что в какой-то момент рассматриваются как удовлетворительное объяснение научной проблемы. По-видимому, Томас Кун имел в виду что-то близкое, когда употреблял термин "парадигмы" [31]. Моя точка зрения, правда, радикально отличается от его точки зрения: я смотрю на эти программы через призму ситуаций, которые могут быть рационально ре-

конструированы, и вижу в научной революции результат рациональной критики, т.е. той деятельности, которую в историческом развитии науки я считаю важнейшей. Пусть опровержение научной теории так влияет на ученого, что выглядит чем-то похожим на обращение в иную веру. Но это будет рациональное обращение (например, ситуация с Резерфордом) [32].

Название "метафизические исследовательские программы" использовалось мною для обозначения некоторых исследовательских программ в науке, а именно – для тех из них, которые экспериментально непроверяемы. Спустя более десяти лет некоторые из моих сотрудников изменили это название, введя термин "научно-исследовательские программы (scientific research programmes)". Разумеется, наука пронизана этими исследовательскими программами, и они играют решающе важную роль в ее развитии. Но обычно они все же не имеют характера проверяемых научных теорий. Они могут *стать* научными теориями, но тогда у нас нет больше повода называть их исследовательскими программами. Ведь в любом случае их намного труднее критиковать, чем теории, и намного легче сохранять не критически.

В самом деле, зачем восхвалять достоинства исследовательских программ. Давайте лучше развивать их методологию. Ученые всем своим образованием помещены внутрь исследовательских программ (в этом отношении Кун, по-видимому, прав). Нет поэтому нужды беспокоиться о поддержке исследовательских программ или о "программировании" ими исследования. Как правило, актуальнее побуждать людей критиковать исследовательские программы или освобождаться от них, чем призывать их принять эти программы и стать их приверженцами.

(Это просто объясняется в терминах ситуационной логики. Молодой ученый, если он не является исключительно одаренным и столь же исключительно хорошо подготовленным, обычно ощущает такую подавленность обилием и разнообразием проблем той области знания, в которую он хочет войти, что им нередко овладевает чувство отчаяния, неверия в свою способность внести свой вклад в ее развитие. Исследовательская программа значительно облегчает

стоящую перед ним задачу. Приведенное ситуационное объяснение может восприниматься как частичная поддержка куновской "нормальной науки".)

Обычно мы сознаем свою исследовательскую программу только тогда, когда на нас нисходит, что она вероятно базируется на *ложной* метафизике. Осознавая, что мы работаем в пределах некоторой метафизической исследовательской программы, мы, в сущности, осознаем, что возможны альтернативы. Это означает, что мы отказываемся от нашей метафизической исследовательской программы как от эвристики и смотрим на ее альтернативы как на нечто возможно более продуктивное.

В тех же редких случаях, когда метафизическая исследовательская программа в самом деле становится осознанной (или даже намеренно вводится, как вводится моя космология предрасположенностей), ее следует рекомендовать лишь с условием соблюдения последовательно критического отношения к ней и поиска возможных альтернатив.

Это вопрос рациональности человека и более специальный вопрос рациональности науки. Нам надо всегда помнить об опасности превращения в "нормальных ученых" – ученых, которые работают слепо, некритически, не осознавая предпосылок своих исследовательских программ. "Нормальный ученый" не стремится быть рациональным настолько, насколько это в его силах, ибо не пытается быть критичным настолько, насколько он может быть критичным.

С моей точки зрения методологи научно-исследовательских программ недостаточно понимают ту фундаментальную роль, которую в развитии знания играет критицизм [33]. Как я вижу эту проблему, критичность – это первейший долг ученого и всякого, кто хочет продвигать вперед познание. С другой стороны, видение новых проблем и обладание новыми идеями – творческая оригинальность, это уже не чей-то долг, это – дар божий.

Притягательная сила исследовательских программ, проявившаяся в этом новейшем течении, глубоко коренится в старой жажде оригинальности и одновременно эвристики, алгоритма, научного метода, ведущего к новым и лучшим идеям [34]. Как я давал понять во всех моих работах, такой эвристики, позитив-

ной методологии, по всей видимости, не существует. Что касается старого вопроса о методе – почему некоторые люди выдвигают хорошие идеи, а другие нет, то надлежащий ответ состоит в том, что у одних людей появляется много идей – среди них возможно есть несколько хороших, – и эти люди весьма критичны в отношении к собственным идеям, тогда как другие имеют мало идей, по отношению к которым они не очень критичны. По всей видимости, каждый может умножить число идей, которыми он располагает, и несомненно быть более критичным в отношении своих идей. Но в любом случае у нас никогда не будет уверенности, что мы продвигаемся в верном направлении. Даже если бы появилась такая эвристика, даже если бы появился проторенный путь к новым идеям или проблемам, выглядящим как "хорошие" или "прогрессивные", нашей первейшей задачей оставалась бы критика этого пути. Мы скорее всего оказываемся на ложном пути тогда, когда думаем, что он прогрессивный. Даже Эйнштейн оказался на ложном пути, разрабатывая свою собственную исследовательскую программу объединения электромагнитных и гравитационных полевых теорий.

КОММЕНТАРИЙ ПЕРЕВОДЧИКА К "ПРЕДИСЛОВИЮ 1982 ГОДА"

Предисловие 1982 г., в котором К. Поппер откликается на современные проблемы и представления философии квантовой механики (началом современного этапа в этой области философии науки обычно считается 1964 г. – публикация статьи Дж. Белла, в которой было выведено неравенство, позволяющее экспериментально проверять достаточно широкий набор теорий со "скрытыми параметрами" [35]), особенно нуждается в комментировании.

К разделу VI

Поппер справедливо считает, что экспериментальные проверки неравенства Белла показали (по крайней мере общественному мнению физиков) справедливость копенгагенской (ортодоксальной) интерпретации квантовой меха-

ники, не допускающей какие-либо "скрытые переменные". Отсюда он заключает, что поскольку копенгагенская интерпретация, чтобы справиться с аргументами типа ЭПР, допускает нелокальность, т.е. грубо говоря род действия на расстоянии, то она входит в противоречие со специальной теорией относительности. Однако вопрос о соотношении квантовой механики и специальной теории относительности, по мнению автора настоящих комментариев, более сложен, нежели он представляется К. Попперу.

В статье, получившей резонанс в западной литературе по философии науки, проанализированы предпосылки, при которых возникает неравенство Белла [36]. С точки зрения авторов этой статьи, нарушение неравенства Белла – нарушение, следующее из квантовой механики и по всей видимости из эксперимента, может рассматриваться как опровергающее каждую из трех нижеследующих посылок неравенства Белла:

1. Квантово-механическое состояние пары частиц, задействованной в эксперименте вместе с состояниями измерительных устройств, причинно определяет результаты измерений при экспериментальной проверке неравенства Белла. При этом слова "причинно определяет" надо понимать в том смысле, который придает им в концепции общих причин Г. Рейхенбаха. Это значит, что корреляция между двумя рядами событий A и B , выражающаяся формулой $p(A/B) > p(A)$, фундируется некоторой общей причиной C , если та "экранирует B от A и A от B ", т.е. ведет к следующим зависимостям: $p(A/B, C) = p(A/C) = p(B/C)$.

Если нарушение неравенства Белла относят на счет только что сформулированной его посылки, то это нарушение означает квазипричинную или даже непричинную связь внутри пары частиц, т.е. связь, которая не может быть описана на языке концепции общих причин Рейхенбаха. Эта связь имеет характер корреляции, обусловленной целостностью всей экспериментальной ситуации.

2. Эксперимент, в котором проверяется неравенство Белла, свободен от каких-либо случайных физически нерелевантных воздействий. Иными словами, под термином "состояние измерительного устройства" не скрываются погодные

условия в данной местности, настроение экспериментатора и т.д.

3. Третьей посылкой является уже условие локальности, нарушение которого означает, вообще говоря, сверхсветовые сигналы или действие на расстоянии, не опосредованное какими-либо промежуточными факторами. Здесь действительно встает вопрос о совместимости квантовой механики и специальной теории относительности. Однако и в данном случае его решение не представляется таким уж однозначным. Дело в том, что нарушение локальности, предполагаемой Беллом, не ведет к эмпирически обнаруживаемому действию на расстоянии, не ведет к тому, что могло бы быть названо "телеграфом Белла".

Поппер считает, что для опровержения специальной теории относительности и не требуется сверхсветовая передача информации. Достаточно дальнего действия, не способного служить сигналом. "Ибо для специальной теории относительности, – пишет Поппер, – два события на оси x , которые одновременны в инерциальной системе отсчета S_1 , никогда не будут одновременны в инерциальной системе отсчета S_2 , даже если нет взаимодействия между этими событиями". (Поппер оговаривает, что речь не идет о системах, движущихся относительно друг друга по оси x .) Это верно, но требует следующих двух комментариев: 1) классическая абсолютная одновременность при ее операциональном осмыслении предполагает сигналы, распространяющиеся со сверхсветовыми скоростями; 2) Поппер не показывает эквивалентности классической одновременности и локальности по Беллу.

Итак, за нарушение неравенства Белла, вытекающее из квантовой механики и, по всей видимости, из эксперимента, вовсе необязательно ответственна нелокальность. Однако если даже за это ответственна именно нелокальность, то и тогда вопрос о противоречии квантовой механики теории относительности остается открытым. Не исключено, что отношение между этими теориями можно характеризовать, вслед за Шимони, как "мирное сосуществование".

К разделу VII

В квантовой механике используются понятия селективного и неселективного измерений. Селективное измерение (по Попперу, "приготовление состояния") "не только разбивает ансамбль объектов на подансамбли, находящиеся в разных состояниях a_1, a_2, \dots , но и выбирает среди них лишь один подансамбль a_i , отбрасывая все остальные...

Неселективное измерение... заключается только в разделении ансамбля на подансамбли, без какого-либо их отбора" [37].

К. Р. Поппер утверждает, что возможны два вида селекции в квантовой механике: селекция, создающая новые предрасположенности (propensities), и селекция, не создающая таковых. Это не вполне понятно. Если мерой предрасположенности служит вероятность, то естественно считать, что всякая селекция меняет предрасположенности. Более того, даже неселективное измерение меняет предрасположенность частицы обнаруживать то или иное свойство. Пусть (см. цитированную книгу, гл. 6) над некоторым объектом производится сначала селективное измерение: $M(b_k, c_i)$, а затем селективное измерение $M(a_j, b_k)$. Селективное измерение $M(b_k, c_i)$ отбирает (или "готовит") состояние b_k частиц, поступающих в прибор в состоянии c_i . Селективное измерение $M(a_j, b_k)$ отбирает состояние a_j частиц, поступающих в состоянии b_k . Предположим теперь, что промежуточное измерение величины B вообще не производится, а также представим себе случай, что на промежуточной стадии осуществляется неселективное измерение величины B , т.е. производится разделение по состояниям b_1, b_2, \dots, b_k , но без отбора. Во всех трех случаях мы будем иметь разные вероятности получения значения a наблюдаемой величины A .

К разделу IX

Предложенный Поппером "простой эксперимент" вызвал критику. Чтобы сделать эту критику более предметной, итальянский физик, занимающийся фи-

лософией квантовой механики, Г.Л. Жирарди выделяет в попперовской аргументации пять пунктов, которые он нумерует буквами греческого алфавита [38].

Ниже следует цитата из попперовского текста, снабженная разбивкой Жирарди:

"Мы достигли таким образом достаточно точного "знания" координаты q_y этой частицы.

(α) Мы косвенно измерили координату этой частицы по оси y . И поскольку, согласно копенгагенской интерпретации, эта координата – наше знание, описываемое теорией и особенно соотношениями Гейзенберга, мы ожидаем, что импульс p_y пучка, проходящего через щель B , рассеивается в той же степени, что и импульс пучка, проходящего через щель A , хотя щель A намного уже, чем широко открытая щель B .

Однако рассеяние может быть, в принципе, проверено посредством установленных счетчиков. Если копенгагенская интерпретация верна, то такие счетчики, находящиеся за B и показывающие широкое рассеяние (и узкую щель), должны теперь подсчитывать совпадения, – счетчики, которые до того как щель A была сужена, не считали какие-либо частицы.

(β) Подведем итог: если копенгагенская интерпретация верна, то любое возрастание точности нашего знания координаты q_y частиц, движущихся направо, должно увеличить их рассеяние, причем это предсказание должно быть проверяемым.

(γ) Я склонен думать, что проверка покажет против копенгагенской интерпретации. Отсюда будет следовать, что тезис Гейзенберга подорван.

(δ) Какой же будет координата, если наш эксперимент вопреки моему личному мнению подтвердит копенгагенскую интерпретацию, т.е. если частицы, чьи координаты по оси y косвенно измерены в B , обнаружат возросшее рассеяние?

(η) Это могло бы интерпретироваться как признак действия на расстоянии, и если эта интерпретация будет принята, то она приведет к тому, что нам

придется отказаться от эйнштейновской интерпретации специальной теории относительности, т.е. вернуться к интерпретации Лоренца, а вместе с нею к ньютоновскому абсолютному пространству и времени".

Жиранди далее формулирует свои комментарии:

1. Проблема не определена точно. Как будет ясно из следующего, положение, обозначенное как (α) , остается неосмысленным, пока не определена точно степень пространственной корреляции частиц.

2. Положение, обозначенное как β , обнаруживает опасное смешение между интерпретацией теории и ее точными формальными правилами. Даже если вы рассматриваете копенгагенскую интерпретацию как неудовлетворительную и неприемлемую, это не означает, что вы имеете право приписывать тем, кто поддерживал эту интерпретацию, предсказания, противоречащие выводам из формализма теории. Принимая это во внимание, не трудно увидеть, что автор в положении β , а также и в положении γ неправильно использует правила квантовой механики и не оценивает в полной степени значимость редукции волнового пакета. Что квантово-механические правила говорят о рассматриваемом эксперименте? В силу доказанной выше теоремы – из квантово-механических правил следует, что все мыслимые эксперименты в B не подвержены влияниям от измерений, выполняемых в A . Положение δ тоже ложное: копенгагенская интерпретация, следующая формальным правилам, не устанавливает, что измерение при A порождает какие-либо эффекты в зоне B . Автор предсказывает, что таков и будет результат эксперимента, но он почему-то утверждает, что это предсказание противоречит тому, которое следует из ортодоксальной квантовой механики. По той же причине положение η неверно и ведет к странным утверждениям, имеющим место в конце цитируемого текста.

Жиранди ссылается на доказанную им теорему, из которой следует, что измерение, выполненное при помощи щели A , не может порождать физические эффекты в B . Он поясняет смысл этой теоремы следующим образом: "Рассмотрим систему $S = S_1 + S_2$ в состоянии

$$|\psi\rangle = \sum |\psi_i^{(1)}\rangle \otimes |\psi_i^{(2)}\rangle,$$

где $|\psi_i^{(1)}\rangle$ и $|\psi_i^{(2)}\rangle$ – состояния, описывающие соответственно частицы 1 и 2, достаточно точно локализованные в пространственных областях, обозначенных 1 – 5 на рис. 3. Поперечная протяженность волнового пакета связана очевидным образом с соответствующим рассеянием по импульсам. Допустим, волновые пакеты соответствуют малому рассеянию по импульсам. В частности, пусть волновой пакет 3, который идентифицируется измерением при A , с открытием щели, обозначенной на рис. 3, соответствует угловому разбросу, также обозна-

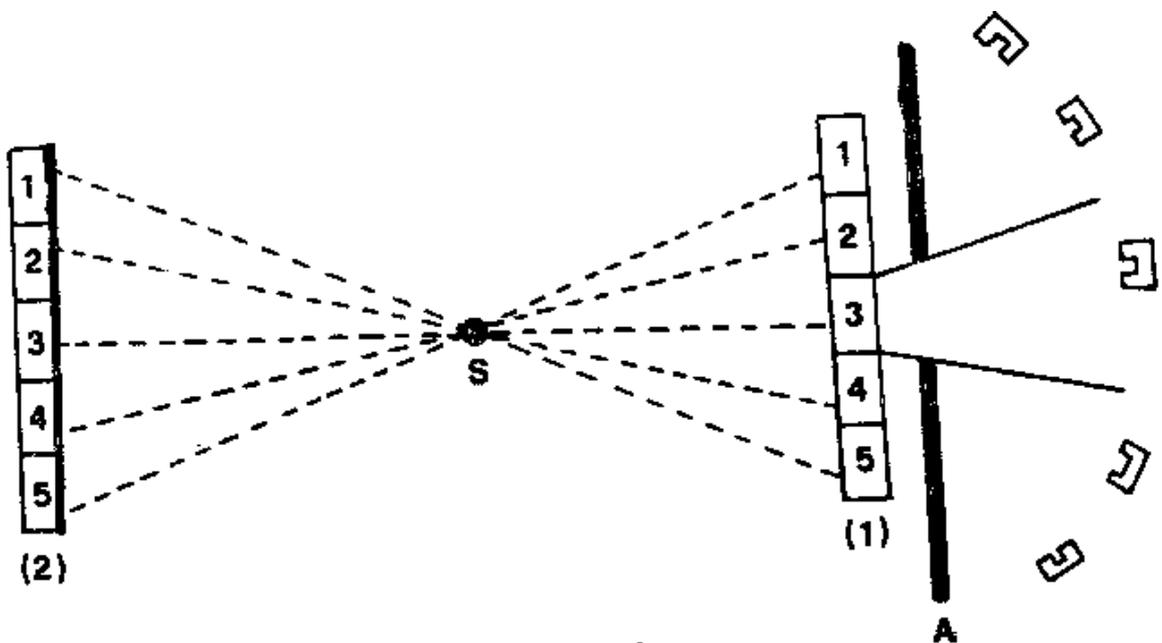


Рис. 3

ченному на этом же рисунке.

В таком случае частицы, прошедшие щель A , не могут фиксироваться (с ощутимой вероятностью) счетчиками, расположенными за пределами этого угла. Сузим щель A . Пучок, который был выделен, теперь оказывается более локализованным в вертикальном направлении. В то же самое время рассеяние p_y после щели увеличится (рис. 4).

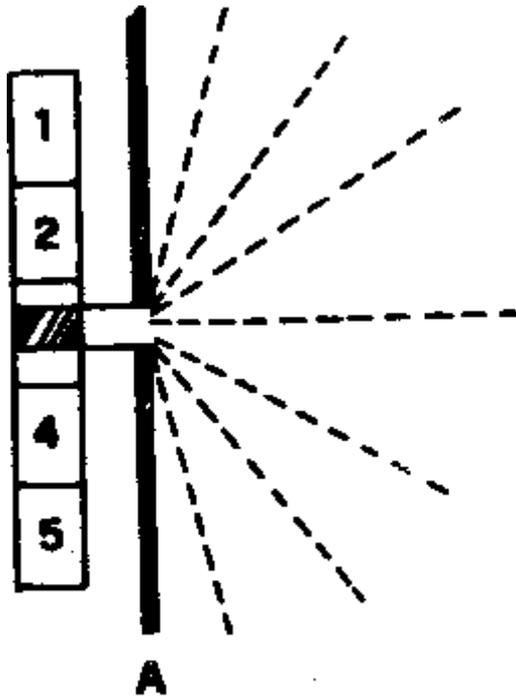


Рис. 4

Однако локализация около A приводит к редукции волнового пакета путем проектирования

$$|\psi\rangle \rightarrow p_{\Delta}^{(1)} |\psi\rangle,$$

где $p_{\Delta}^{(1)}$ проектирует на линейное многообразие функций $\psi^{(1)}$, которое отлично от нуля только в интервале Δ новой суженной щели A . Отсюда получаем формулу

$$p_{\Delta}^{(1)} |\psi\rangle = [p_{\Delta}^{(1)} |\psi_3^{(1)}\rangle] \otimes |\psi_3^{(2)}\rangle,$$

демонстрирующую, что компонент волновой функции, относящийся к системе 2, остается локализованным точно так же, как и прежде. Это в точности соответствует результату редукции волнового пакета, предполагаемому как квантовой механикой, так и ее копенгагенской интерпретацией. Очевидно, если выбран волновой пакет $|\psi_i\rangle$, с самого начала локализованный лучше, чем Δ , то измерение в окрестности A вызовет редукцию к некому более локализованному состоянию в B . В таком случае, однако, и при отсутствии какого-либо измерения имеет место более широкий разброс по импульсам.

Примечания

1. Приведены годы появления первой статьи Эйнштейна о специальной теории относительности, его беседы с Гейзенбергом и моего визита к нему.
2. См. в особенности: *Conjectures and Refutations*. Chap. 3. Sec. 6 (написано в 1954 г., впервые опубликовано в 1956 г.); *Objective Knowledge*. Chap. 2. Sec. 5 [Рус. пер.: Поппер К. *Логика и рост научного знания*. М.: Прогресс, 1983. С. 290-325].
3. См.: *Conjectures and Refutations*. Chap. 3. Sec. 1 and 2 [Рус. пер.: Поппер К. *Логика и рост научного знания*. М.: Прогресс, 1983. С. 290-325].
4. Кант И. *Соч.*: В 6 т. М.: Мысль, 1965. Т. 4.
5. *Conjectures and Refutations*. Chap. 8. P. 191.
6. Einstein A. *On the Method of Theoretical Physics* (The Herbert Spenser Lecture, 1933). Oxford, 1933 [Рус. пер.: Эйнштейн А. *Собр. науч. тр.* М.: Наука, 1967. Т. 4. С. 181-186].
7. Bryce S. de Witt. *Quantum Mechanics and Reality* // Bryce S. de Witt, Neill G. *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton, 1973. P. 160-161.
8. Его быстро убедили два моих аргумента. Согласно первому, даже если бы мы все знали, мы все равно были бы вынуждены выводить из этого знания *статистическую информацию*, чтобы рассмотреть такие существенно *статистические проблемы*, как объяснение давления газа или интенсивности спектральных линий. Второй аргумент, тесно связанный с первым, был общим логическим аргументом о том, что мы нуждаемся в статистических или вероятностных посылах (в статистической или вероятностной теории), чтобы выводить статистические заключения.
9. Heisenberg W. *Der Teil und das Ganze*. P. 138 [Рус. пер.: Гейзенберг В. *Физика и философия. Часть и целое*. М.: Наука, 1989. С. 223].

10. Albert Einstein – Hedwig und Max Born. Briefwechsel: 1916-1955, Munich, 1969 или The Born – Einstein Letters, New York, 1971. P. ix-x [В рус. пер.: Переписка Эйнштейна с М. Борном и его женой // Эйнштейновский сборник. 1971. М.: Наука, 1972. С. 7-54; Эйнштейновский сборник. 1972. М.: Наука, 1974. С. 7-103 (предисловие Гейзенберга опущено)].
11. Weizsäcker C.F. von, Waerden B.L. van der. Werner Heisenberg. Munich, 1977.
12. Daedalus, 87, 1958. P. 95-108.
13. The Nature of Physical Universe: 1976 Nobel Conference. New York, 1979. P. 29.
14. Einstein A., Podolsky B., and Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? // Physical Review. Ser. 2, 47, 1935. P. 777ff [Рус. пер.: Эйнштейн А. Собр. науч. тр. М.: Наука, 1966. Т. 3. С. 604-611].
15. Это, конечно, далеко не вся история. Более полный исторический очерк содержится в кн.: Hanson N.R. The Concept of Positron. Cambridge, 1963. P. 143-158. Эти страницы стоит прочитать всякому интересующемуся историей позитрона.
16. Santilli R.M. Intriguing Legacy of Einstein, Fermi, Jordan and Others: The Possible Invalidation of Quark Conjectures // Foundations of Physics. Vol. 11. 5/6. 1981. P. 383-472 (в особенности P. 448). Сантилли ссылается здесь на свою статью в Hadronic Journal. 1979. № 2. P. 1460.
17. См. мою статью: Particle Annihilation and the Argument of Einstein, Podolsky, and Rosen // Perspectives in Quantum Theory / Ed. W. Yourgrau, A. van der Merwe. 1971. P. 182-198. Теперь я не удовлетворен этой статьей. См. превосходный ответ Белла в журнале: Science. Vol. 177. 1972. P. 880, а также его статью в кн.: Foundations of Quantum Mechanics. Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi" / Ed. B. d'Espagnat. 1971. P. 171.
18. Bohm D. Quantum Theory. 1951 [Рус. пер.: Бом Д. Квантовая теория. М., 1961]; Physical Review. Vol. 85. P. 169-193.
19. Законы природы запрещают определенные классы событий, и принцип Гей-

зенберга здесь не исключение: некоторые логически возможные физические события, например луч света, проходящий через щель без рассеяния, логически противоречили бы теории. Всегда находились люди, которые склонялись к тому, чтобы называть такие запрещенные события бессмысленными. Но это ошибочно: мы должны различать, по крайней мере, три различные категории: логически возможные события, запрещенные теорией, логически невозможные события (события, запрещенные логикой) и бессмысленные псевдопредложения. Последние были особенно популярны в двадцатые и тридцатые годы, главным образом благодаря *Tractatus* Витгенштейна и его влиянию на Венский кружок. Я подозреваю, что именно это влияние побудило фон Неймана сконструировать язык, в котором формулы, запрещенные Гейзенбергом, исключались бы как бессмысленные. Я не думаю, что такой язык мог бы быть полезным или что он мог решить какую-либо физическую проблему. Я думаю также, что философские проблемы таким образом только запутывались.

20. См. прекрасное краткое описание Эйнштейном ЭПР аргумента в его письме ко мне, датированном 11 сентября 1935 г. и опубликованном в ЛНО [Рус. пер.: Эйнштейновский сборник: 1975-1976. М.: Наука, 1978. С. 283-285].
21. Эйнштейновский сборник: 1975-1976. С. 284.
22. Физики часто пишут о том, что только возможность послать сигнал со скоростью света, опровергла бы специальную теорию относительности. Это, однако, неверно. Как только мы скажем, что два события одновременны в абсолютном смысле этого слова, мы пойдем против эйнштейновской релятивистской интерпретации формализма Эйнштейна – Лоренца. Ибо в пределах специальной теории относительности два события на оси x , одновременные в системе отсчета S_1 , никогда не будут одновременны в инерциальной системе S_2 , если только S_1 и S_2 не движутся друг относительно друга вдоль оси x , даже когда нет никакого взаимодействия (и, стало быть, сигнала) между этими двумя событиями.
23. Следует вспомнить, что Бор обращался к общей теории относительности,

- защищая общезначимость соотношений Гейзенберга (см.: Albert Einstein: *Philosopher-Scientist*. P. 225-228). [Рус. пер.: Бор Н. Избр. науч. тр. М.: Наука, 1971. Т. 2. С. 419-422].
24. Einstein A. *Quantenmechanik und Wirklichkeit // Dialectica*. November 1948. P. 320-324 [Рус. пер.: Эйнштейн А. Собр. науч. тр. М.: Наука. 1966. Т. 3. С. 612-616].
25. Белл отмечает, что боровская версия ЭПР решающего эксперимента возможна с поляризованной частицей *B*. Иными словами, когда мы что-то делаем с частицей *A*, согласно квантовой теории что-то в то же самое время случается с частицей *B*. Согласно же реализму здравого смысла и локальной теории частица *B* не подвергается какому-либо воздействию – по крайней мере в то же самое время. Такие эксперименты не просто решающие в плане вопроса относительно того, соответствует ли копенгагенская интерпретация квантово-теоретическому формализму. Они решающие в плане выбора между квантово-теоретическим формализмом и копенгагенской интерпретацией, с одной стороны, и локальными теориями и, следовательно, специальной теорией относительности, с другой стороны (см.: Clauser J.F., Shimony A. *Bell's Theorem: Experimental Test and Implications // Reports on Progress in Physics*, 1978. См. также обсуждение Поппером версии Боба в ЛНО, Appendix XI).
26. Я полагаю, что идея приготовления состояния в том ее смысле, в котором она сейчас используется в квантовой механике, была введена мною в 1934 г. в ЛНО (см. с. 225-226). Я называл тогда это приготовление "физической селекцией" и отличал его как предсказательное измерение от того измерения, которое именовал ретросказательным (вроде регистрации частицы на фотографической пластинке). Последнее, как правило, сильно воздействует на частицу и может даже разрушить ее. Генри Маргенау упомянул о приготовлении состояния в 1937 г.
27. Эти два вида приготовления состояния не следует смешивать с двумя видами измерения, которые были упомянуты в предыдущей сноске: ретросказа-

тельным и предсказательным (лишь последний представляет собой приготовление состояния). Предсказательные измерения или приготовления состояния всегда производят рассеяние тех "наблюдаемых", которые описываются переменными, не коммутирующими с теми переменными, которые характеризуют приготовляемое состояние. Измерение спина (или приготовление состояния) носит "мышеловочный" характер, как я объяснил в ЛНО, Appendix *XI. Однако то, что справедливо для спина, не справедливо для координаты и импульса. Только спин имеет это странное свойство.

28. Albert Einstein: *Philosopher-Scientist*, 1949. P. 85. Перевод этого места слегка исправлен [Рус. пер.: Эйнштейн А. Автобиографические заметки // Эйнштейн А. Собр. науч. тр. М.: Наука, 1967. Т. 4. С. 290].
29. Этот эксперимент может быть в принципе проведен с парой фотонов, созданной аннигиляцией частиц.
30. Интерес к физической космологии в годы, следовавшие за периодом, когда я написал эту часть Постскрипума, повел меня за пределы физики, в особенности в биологию, к изучению человеческого духа и продуктов человеческого духа, которые я назвал третьим миром. См.: *Objective Knowledge*, 1972; *The Self and Its Brain*, 1977, а также *Afterword* и *Addenda* к второму тому Постскрипума.
31. Kuhn T.S. *The Structure of Scientific Revolutions*, 1962 [Рус. пер.: Кун Т. Структура научных революций. М.: Прогресс, 1975].
32. См. мою статью: *Rationality of Scientific Revolutions* (Спенсеровская лекция) // *Problems of Scientific Revolutions: Progress and Obstacles to Progress in the Sciences*, 1975.
33. См.: *Criticism and Growth of Knowledge*. 1970. Русский перевод статьи И. Лакатоса "Фальсификация и методология научно-исследовательских программ" из этой книги вышел отдельным изданием (М.: Медиум, 1995).
34. См.: *Realism and the Aim of Science* – первый том настоящего Постскрипума. Из введения к этой книге читатель уяснит, что я в течение многих лет возражал тем, кто считал, что такая эвристика возможна.

35. Ballentine L.E. Foundations of Quantum Mechanics since the Bell's Inequality // American Journal of Physics. 1987. Vol. 55. № 9.
36. Ballentine L.E., Jarrett J.R. Bell's Theorem: Does Quantum Mechanics Contradict Relativity? // American Journal of Physics. 1987. Vol. 55. № 8. P. 697.
37. Кемпфер Ф. Основные положения квантовой механики. М.: Мир, 1967. С. 54.
38. Ghirardi G.C. Some Critical Considerations on the Present Epistemological and Scientific Debate on Quantum Mechanics // The Nature of Quantum Paradoxes. Dordrecht, etc.: Kluwer Academic, 1988. P. 96.