

ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ

Алексеев И.С.

Глава VIII из книги "Методологические принципы физики. История и современность". М.: Наука, 1975

Проблема интерпретации квантовой механики, формирование математического аппарата которой было закончено к началу 1927 г., потребовала для своего разрешения создания новых логико-методологических средств. Одним из них является боровский принцип дополнительности, согласно которому *для полного описания квантовомеханических явлений необходимо применять два взаимоисключающих ("дополнительных") набора классических понятий, совокупность которых дает исчерпывающую информацию об этих явлениях как о целостных.*

Этот принцип стал ядром "ортодоксальной" (так называемой копенгагенской) интерпретации квантовой механики. С его помощью получил объяснение корпускулярно-волновой дуализм микрообъектов, долгое время не поддававшийся никакому рациональному истолкованию. Принцип дополнительности сыграл главную роль при отражении изоощренных критических возражений в адрес копенгагенской интерпретации со стороны А. Эйнштейна.

С самых первых шагов идея дополнительности рассматривалась ее автором как выходящая за рамки собственно физического познания. Уже в первой статье "Квантовый постулат и новейшее развитие атомной теории", излагающей концепцию дополнительности, Н. Бор указал в заключительной фразе, что ситуация, сложившаяся в связи с проблемой интерпретации квантовой механики, "имеет далеко идущую аналогию с общими трудностями образования человеческих понятий, возникающими из разделения субъекта и объекта" [1, с. 53].

Впоследствии он неоднократно отмечал характерные дополнительные черты во многих областях человеческого знания.

Небезынтересно заметить, что сам Бор никогда не употреблял слово "принцип" для характеристики выдвинутой им идеи дополнительности. Тем не менее квалификация этой идеи именно как методологического принципа оправдана и распространена повсеместно. В этой связи показателен следующий факт. Статья, которую написал один из ближайших сподвижников Бора – Л. Розенфельд, подчеркивавший, что "всякая попытка построить систему из его (Бора. – И.А.) философии фактически означает отказ от самого ее духа", поскольку "философия Бора не претендует на то, чтобы свести все законы природы к небольшому числу принципов, для Бора характерно, что он избегает такого слова, как "принцип"..." [2, с. 9], – получила при переводе название "Развитие принципа дополнительности" [3, с. 61].

Новизна и плодотворность принципа дополнительности побуждает многих рассматривать его как "в некотором смысле самую революционную философскую концепцию нашего времени" [4, р. 374], считать, что "принцип дополнительности определяет современный идеал науки" [5, с. 71]. Однако наряду с этими чрезвычайно высокими оценками можно встретить и резко отрицательное отношение к методологическому содержанию концепции дополнительности (см., например: [6, р. 144]). Нет единодушия по поводу принципа дополнительности и в нашей философской литературе (см. также: [7]).

Задача этой главы, с одной стороны, проследить истоки концепции дополнительности и пути ее формирования и развития в трудах Н. Бора, а с другой – рассмотреть проблемы, возникающие в связи с историей полемики вокруг принципа дополнительности и обсуждением его современного статуса.

1. Формирование идеи дополнительности Н. Бором

Нильс Бор и световые кванты. Начиная со статьи 1913 г. "О строении атомов и молекул", в которой идеи Планка были применены к атомной модели

Резерфорда, квантовые представления долгое время интересовали Бора исключительно с точки зрения их приложения к теории строения атома [8, p. 17]. "Условие частот", составлявшее содержание второго постулата Бора, правда, связывало энергетические характеристики стационарных состояний атома с частотой излучения, испускаемого при переходах между ними. Но само излучение привлекало внимание Бора не как самостоятельный объект исследования, а лишь постольку, поскольку свойства и закономерности линейчатых спектров были связаны с процессами движения электронов внутри атома.

Другими словами, излучение рассматривалось не как свободное, а либо как испускаемое, либо как поглощаемое атомными системами.

Особенно четко и ясно указанная особенность подхода Бора к явлениям излучения обнаруживается в применении принципа соответствия, возникновение которого, по словам Бора, было обусловлено "стремлением достичь простого асимптотического соответствия между спектром и движением атомной системы в пограничной области, где стационарные состояния сравнительно мало отличаются от друга. Согласно этому принципу принимается, что осуществление любого процесса перехода, связанного либо с испусканием, либо с поглощением излучения, обусловлено наличием определенных соответствующих гармонических компонент движения системы... Что касается структуры испущенного излучения, то непосредственно по смыслу этого принципа следует ожидать, что оно будет отражать характер соответствующих компонент колебания, некоторым образом определяемых требованием классической электродинамики о прямой связи между строением излучения электрической системы и ее движением" [9, с. 294].

Для понимания связи между квантовой структурой излучения и строением атома вовсе не было обязательным затрагивать проблему двойственной корпускулярно-волновой природы света. И действительно, вплоть до 1922 г. Н. Бор либо вообще не упоминает о ней (в большинстве своих статей), либо отказывается ее обсуждать. "Я не буду останавливаться на хорошо известных затруднениях, к которым приводит так называемая *гипотеза световых квантов* в явлении

ниях интерференции, столь просто объясняемой в классической теории излучения. Я вообще не намерен входить в обсуждение загадки, связанной с природой излучения" [9, с. 249], – заявил он в берлинской лекции 1920 г.

Тем не менее позиция Н. Бора по отношению к проблеме структуры свободного излучения была четкой и определенной. По выражению М. Джеммера, она заключалась в "непреклонном неприятии эйнштейновских световых квантов" [10, р. 345], предполагавших дискретность пространственной структуры излучения. Для Бора было вполне достаточно планковских квантов энергии, относившихся к взаимодействию излучения с атомами и представлявших собой дискретные порции энергии, непрерывно распределенной в некоторой области пространства. Не полемизируя явно с эйнштейновской концепцией, Бор неявно возражал ей тем, что, говоря о квантах излучения в связи со своим "условием частот", всегда ссылаясь на Планка (иногда прямо употребляя выражение "планковские кванты энергии"[9, с. 90]), но никогда – на Эйнштейна, очень редкие ссылки на которого ни в одном случае не имеют целью указать на следование его представлению о квантах света.

В этой связи следует отметить неточность Дж. Холтона, который модернистки безоговорочно приписывает Бору использование эйнштейновских световых квантов уже в атомной модели 1913 г. [11, р. 1026]. В действительности же Бор в статьях, написанных в период, предшествовавший формированию принципа дополнительности, специально подчеркивал волновую структуру излучения, испускаемого при переходах между стационарными состояниями [9, с. 293, 319, 502]. Лишь в более поздних работах, ретроспективно рассказывая о своей модели 1913 г., он стал связывать переходы между стационарными состояниями с испусканием световых квантов [1, с. 254, 474].

Начиная с 1923 г., Бор высказывается гораздо более определенно. В большой статье "О применении квантовой теории к строению атома" Бор посвятил обсуждению гипотезы световых квантов специальный параграф. Прежде всего, он снова отметил, что, несмотря на "большое значение для понимания некоторых классов явлений..., обсуждаемая гипотеза не может все же рассмат-

риваться как удовлетворительное решение... Во всяком случае, можно утверждать, что лежащее в основе гипотезы световых квантов положение принципиально исключает возможность осмысления понятия частоты ν , играющей главную роль в этой теории [9, с. 518].

Однако следующая фраза Н. Бора свидетельствует о том, что его категорический отказ признавать эйнштейновские кванты имел силу только по отношению к свободному излучению в пустом пространстве: "Напротив, способ объяснения, при котором гипотеза передает лишь некоторые стороны явлений, пригоден для обоснования воззрения, рассматриваемого с различных сторон; в противоположность принятому в классической физике описанию явлений природы... полное пространственно-временное описание процессов в атомах не может быть произведено с помощью понятий, заимствованных из классической электродинамики" [9, с. 518].

Эти слова можно рассматривать как первую отчетливую формулировку подхода, который впоследствии получит обоснование и будет узаконен в принципе дополненности. Пока, в 1923 г., такой подход, при котором одни стороны явлений объясняются одной гипотезой, а другие – противоположной, рассматривался Бором как временный, паллиативный. Его занимал "вопрос о возможности создания единой картины процессов", решению которого мешали "принципиальные трудности, возникающие при попытке указать появление прерывностей в атомных процессах при применении понятий классической электродинамики". Мириться с этими трудностями путем принятия непрерывности излучения в пустом пространстве и его дискретности для процессов в атомах Бор тогда не хотел, для него не было сомнений в том, что "в будущем надо искать полное обобщенное описание процессов" [9, с. 517, 519].

Программа такого описания была изложена Бором в работе "Квантовая теория излучения", вышедшей в следующем 1924 г. и написанной в содружестве с Г. Крамерсом и Дж. Слетером. Эта совместная статья, которая, по словам В. Гейзенберга, была "первой серьезной попыткой разрешить рациональным путем парадоксы излучения" [12, с. 23], начиналась с констатации дуализма

прерывного и непрерывного в процессах взаимодействия излучения и вещества, что представляло собой новый оттенок в постановке этой старой проблемы [9, с. 526]. Отметив, что привлечение свойств прерывности необходимо для описания обмена энергией и импульсом между веществом и излучением, авторы примкнули к точке зрения Бора в оценке эйнштейновских квантов света: "...Очевидно..., что теорию световых квантов нельзя рассматривать как удовлетворительное решение проблемы распространения света. Это ясно уже из того факта, что появляющаяся в теории "частота" излучения ν определяется из экспериментов, основанных на явлениях интерференции, для интерпретации которых требуются, очевидно, представления о волновой структуре света" [9, с. 528].

Основываясь на идее Дж. Слетера, который стремился "построить более адекватную картину оптических явлений, чем та, которая существовала до сих пор, путем ассоциирования существенно непрерывного поля излучения с непрерывностью существования в стационарных состояниях, а дискретные изменения энергии и импульса с дискретными переходами из одного стационарного состояния в другое" [13, р. 307], авторы статьи предположили, что "атом, находящийся в определенном стационарном состоянии, связан с другими атомами посредством некоторого пространственно-временного механизма, виртуально эквивалентного полю излучения, которое создавалось бы, согласно классической теории, виртуальными гармоническими осцилляторами, соответствующими различным возможным переходам в другие стационарные состояния" [9, с. 531]. Таким образом удавалось дать более подробную пространственно-временную картину процессов перехода между стационарными состояниями. Эти переходы, по мысли Слетера, были с одной стороны, статистически обусловлены (в духе идей А. Эйнштейна, высказанных в 1917 г. [14, с. 393]) виртуальным полем излучения, а с другой – "не имели никакого другого смысла кроме как обозначать переход к новому стационарному состоянию и замену непрерывного излучения, соответствующего старому состоянию на соответствующее новому" [13, р. 307].

Иными словами, по мысли авторов статьи, атомы теперь излучали в стационарных состояниях; переходы между ними имели смысл изменения спектрального состава излучения, перестройки того "виртуального оркестра" [15, S. 457], который представлял собой атом. В этой картине эйнштейновским световым квантам не было места – излучение было непрерывным в пространственном отношении, и, что самое главное, в модели Бора – Крамерса – Слетера предполагалась независимость отдельных процессов перехода. Эта точка зрения резко противоречила классическим законам сохранения энергии и импульса. "Мы предполагаем, – писали авторы, – что индуцированный переход в атоме не вызывается непосредственно переходом в некотором отдаленном атоме, у которого разность энергий между начальным и конечным стационарными состояниями имеет такую же величину. Напротив, атом, способствующий осуществлению индуцированного перехода в одном из отдаленных атомов посредством виртуального поля излучения определенной частоты, соответствующей одному из возможных переходов в другие стационарные состояния, может в результате совершить какой-либо другой из возможных переходов... Эта независимость сводит к статистической закономерности не только сохранение энергии, но и сохранение импульса" [9, с. 533].

Таким образом, "сомнения относительно того, действительно ли может быть дано детальное описание процесса взаимодействия между веществом и излучением при помощи причинного описания в пространстве и времени, как это до сих пор делалось для объяснения явлений природы" [9, с. 530-531], оказались оправданными. Бор пожертвовал законами сохранения (и, следовательно, классическим детерминизмом) не столько для того, чтобы сохранить пространственно-временной способ описания – он сохранялся и в рамках гипотезы световых квантов, – сколько для того, чтобы изгнать эти кванты из картины процесса излучения [8, р. 3].

Дискретность воплощалась у Бора не в квантах света, а в процессах перехода от одного состава непрерывного излучения к другому.

Интересно заметить, что Слетер, автор гипотезы о виртуальном поле излучения, первоначально рассматривал его как управляющее поведением квантов света. Последнее он предпочитал полагать в качестве реальных сущностей, удовлетворяющих законам сохранения. Волны определяли, по Слетеру, вероятность существования квантов света в некотором данном месте в данное время. Однако Н. Бор и Г. Крамерс так энергично возражали против этого, что Слетер "увидел, что единственным способом сохранить мир и опубликовать основную часть предположения было согласие с их статистическими идеями" [16, р. 13].

Законы сохранения энергии и импульса должны были согласно модели Бора нарушаться и в процессах рассеяния излучения электронами, в частности в эффекте Комптона. Но в следующем, 1925 г., опыты Боте – Гейгера по рассеянию рентгеновских лучей установили однозначную связь между испусканием электронов отдачи, сопровождающих рассеяние, и испусканием фотоэлектронов обусловленным рассеянием, что соответствовало квантовой (основанной на представлении о квантах света) теории эффекта Комптона. Поскольку такая связь не должна была бы существовать с точки зрения, развивавшейся в работе Бора – Крамера – Слетера, Бор мужественно счел необходимым "без сожаления оставить принятый в работе путь" и согласиться, что "эта связь в соответствии с квантовой теорией света Эйнштейна навязывает нам корпускулярную картину распространения света" [9, с. 560, 561]. Это было первым признанием эйнштейновских световых квантов.

В вопросе о природе света Бор, однако, увидел гораздо более общую, – не столько физическую, сколько методологическую проблему. "Следует подчеркнуть, – писал он, – что вопрос о существовании или отсутствии связи отдельных атомарных процессов нельзя просто рассматривать как различие между двумя четко определенными толкованиями распространения света в пустом пространстве, которые соответствовали бы корпускулярной или волновой теории света. Скорее всего речь идет о том, в какой степени пространственно-временные понятия, при помощи которых до сих пор пытаются объяснить явления природы, применимы в атомарных процессах" [9, с. 560].

Таким образом, если в статье 1924 г. Бор жертвовал законами сохранения ради пространственно-временных образов, то теперь, в 1925 г., он был вынужден поступить наоборот: "Если постулировать строгую выполнимость законов сохранения, то... мы должны ожидать... такие действия, которые настолько же чужды применению первичных пространственно-временных образов, как чужды друг другу связь индивидуальных процессов в отдельных атомах и волновое описание оптических явлений" [9, с. 561].

Начиная с этого момента, корпускулярно-волновая дилемма, а вместе с ней и более общая дилемма – "законы сохранения – пространственно-временные образы", по-видимому, постоянно владели помыслами Бора. Продолжая настаивать на формальном характере эйнштейновских световых квантов (см.: [1, с. 9]) и в то же время убеждаясь в их реальности неоспоримыми экспериментальными доказательствами, Н. Бор снова апеллировал к "недостатку пространственно-временных образов" (см.: [1, с. 13]). Выход из затруднений, связанных с их применением, он одно время надеялся увидеть в гейзенберговской матричной механике, которая, "в противоположность обычной механике... не имеет дела с описанием движения атомных частиц в пространстве и времени" [1, с. 22]. Однако успехи гипотезы Уленбека – Гаудсмита о вращающемся электроде, примененной для объяснения тонкой структуры спектров, снова ослабили отрицательное отношение Бора к наглядным пространственно-временным представлениям. По его словам, эта гипотеза "открывает обнадеживающие перспективы возможно более глубокого объяснения свойств элементов посредством механических моделей" [1, с. 25].

Все эти колебания, затруднения и сомнения в конце концов были преодолены в 1927 г., когда Бор пришел к своей концепции дополнительности, уже давно медленно, но верно вызревавшей в его мышлении.

"Квантовый постулат", дополнительность и дуализм. Основы идеи дополнительности, по свидетельству В. Гейзенберга, выкристаллизовались у Н. Бора в начале 1927 г. во время отдыха в Норвегии, последовавшего за несколькими месяцами изнурительных копенгагенских дискуссий, "в ходе которых

пригодность каждой новой попытки интерпретации проверялась до малейших подробностей при помощи реальных или воображаемых экспериментов" [12, с. 26]. Первым публичным изложением концепции дополнительности была лекция Н. Бора, прочитанная 16 сентября 1927 г. на Международном физическом конгрессе в Комо (Италия), посвященном памяти А. Вольты. Ее переработанное содержание было опубликовано в 1928 г. в журнале "Nature" под названием "Квантовый постулат и новейшее развитие атомной теории".

Разъяснение концепции дополнительности Н. Бор начинает с указания на своеобразную противоречивую ситуацию, сложившуюся в связи с интерпретацией квантовой теории. С одной стороны, констатирует Бор, "квантовая теория характеризуется признанием принципиальной ограниченности классических физических представлений в применении к атомным явлениям" [1, с. 30]. Это обстоятельство, казалось бы, должно было породить стремление избавиться от классических понятий и образов и сформулировать новые, специфически квантовые представления, свободные от указанной ограниченности. С другой стороны, у Бора не вызывало никаких сомнений то, что "интерпретация эмпирического материала в существенном покоится именно на применении классических понятий" [1, с. 30].

Таким образом, классические понятия, по мысли Бора, были необходимы и в квантовой механике. Отказаться от них совершенно было нельзя. Но применяться они могли не во всей своей полноте – использование классических представлений нужно было ограничить. Концепция дополнительности представляла собой с этой точки зрения четко определенный способ такого ограничения, заключавшийся в расщеплении характерного для классической физики причинного пространственно-временного описания событий на два. "В соответствии с самой природой квантовой теории мы должны считать пространственно-временное представление и требование причинности, соединение которых характеризует классические теории, как дополнительные, но исключают одна другую черты описания содержания опыта" [1, с. 31]. В таком контексте впервые появляется у Бора термин "дополнительный".

Только что приведенным словам, которые представляют собой формулировку принципа дополнительности, в тексте статьи предшествует обоснование необходимости расщепления единого классического описания на два дополняющих и исключаящих друг друга. Это обоснование опирается на два исходных пункта: во-первых, на так называемый квантовый постулат и, во-вторых, на подчинение квантовому постулату процесса наблюдения атомных явлений.

Согласно квантовому постулату "каждому атомному процессу свойственна существенная прерывность или, скорее, индивидуальность, совершенно чуждая классической теории и выраженная планковским квантом действия" [1, с. 30]. Само по себе это обстоятельство стало уже привычным для физиков, так что Н. Бор как будто бы не сказал здесь ничего нового. Эффект Комптона, переходы между стационарными состояниями атома и фотоэффект уже давно характеризовались чуждой классической теории неделимой целостностью, явно обнаруживая черты дискретности. Но ранее все эти дискретные процессы не имели отношения к наблюдению и трактовались исключительно как происходящие "сами по себе" в природе как таковой.

Решающей особенностью применения Бором квантового постулата было распространение его на процедуры наблюдения за атомными процессами. Это было стимулировано работой В. Гейзенберга по установлению соотношений неопределенности. По словам Бора, суть гейзенберговской концепции состояла в "неизбежности квантового постулата при оценке возможностей измерения" [1, с. 37].

Вопрос о связи принципа неопределенности с принципом дополнительности будет подробнее рассмотрен ниже. Пока же целесообразно ограничиться замечанием, что благодаря применению квантового постулата к процессам наблюдения (измерения) последние также зачислялись в разряд атомных процессов. Проанализировав эти процессы наблюдения, Бор обосновал концепцию дополнительности. Именно в этом заключалось основание отказа от классического объединенного причинного пространственно-временного способа описания и замены его на дополнительный.

Ход мысли, ведущий от квантового постулата к дополнителности, у Н. Бора таков. Обычно (классическое) описание природы "покоится всецело на предпосылке, что рассматриваемое явление можно наблюдать, не оказывая на него заметного влияния". Иное положение дел в квантовой области. "Согласно квантовому постулату, всякое наблюдение атомных явлений включает такое взаимодействие последних со средствами наблюдения, которым нельзя пренебречь" [1, с. 31]. Это взаимодействие представляет собой неделимый, индивидуальный процесс, целостность которого воплощается в планковском кванте действия. А поскольку взаимодействие наблюдаемых микрообъектов и средств наблюдения имеет неделимый характер, то "невозможно приписать самостоятельную реальность в обычном физическом смысле ни явлению, ни средствам наблюдения".

Естественно, что "такая ситуация влечет за собой далеко идущие следствия". С одной стороны, определение состояния наблюдаемой физической системы в обычном понимании (т.е. ее состояние "самой по себе") требует исключения всяких внешних воздействий, в том числе и воздействий, обусловленных наблюдением. "В таком случае, согласно квантовому постулату, всякое наблюдение будет невозможным, и прежде всего понятия пространства и времени теряют свой непосредственный смысл". С другой стороны, если допустить некоторые взаимодействия с соответствующими, не принадлежащими наблюдаемой системе средствами наблюдения, чтобы сделать последнее возможным, "то однозначное определение состояния системы, естественно, становится уже невозможным, и не может быть речи о причинности в обычном смысле". Это происходит потому, что средства наблюдения и наблюдаемая система образуют индивидуальную целостность, так что распределение энергии и импульса (сохранение которых применительно к системе обеспечивало возможность ее причинного описания) между ними становится неопределенным.

Отсюда и проистекает дополнительный характер квантовомеханического способа описания атомных систем. При их изоляции, фиксирующей определенные сохраняющиеся значения энергии и импульса системы, ее эволюция может

быть описана причинным образом, но зато теряется возможность построения пространственно-временной картины этого процесса. Ликвидация изоляции путем наблюдения устраняет и возможность применения законов сохранения, открывая простор для построения пространственно-временной картины. Дополнительные черты, таким образом, "символизируют идеализацию возможностей наблюдения и, соответственно, определения" характеристик атомных систем.

Итак, классические понятия пространственных координат и времени, с помощью которых строится пространственно-временная, чисто кинематическая картина процессов, и энергии и импульса, обеспечивающие построение причинной, динамической картины процессов, остаются как таковые применимыми и в квантовой области. Меняется только способ их сочетания – в строгом, точном смысле они не могут применяться совместно. Поэтому дополнительный способ описания можно назвать *неклассическим употреблением классических понятий*. Его специфика заключается в иной по сравнению с классической физикой сочетаемости этих понятий, в запрещении объединенного использования в одной картине кинематических (пространственно-временных) и динамических (энергетически-импульсных, причинных) характеристик процессов.

При этом, однако, необходимо иметь в виду следующее. Взаимное исключение дополнительных аспектов квантовых явлений, хотя и запрещало их *объединенное* использование, тем не менее предполагало их *совместное* употребление в том смысле, что вместо *одной* объединенной картины необходимо было совместно использовать *две* картины – энергетически-импульсную и пространственно-временную. Бор подчеркивал, что "не может быть и речи о совершенно независимом применении идей пространственно-временного описания и причинности..., которые лишь вместе дают естественное обобщение классического способа описания" [1, с. 32].

Концепция дополнительности дала возможность Бору рационально разрешить проблему корпускулярно-волнового дуализма, интенсивно обсуждавшуюся в связи с вопросом о природе света и элементарных составных частиц материи (вещества). "Что касается света, его распространение в пространстве и

времени, как известно, адекватно описывается электромагнитной теорией. В частности, интерференционные явления в вакууме и оптические свойства материальных сред всецело управляются принципом суперпозиции волновой теории. Тем не менее сохранение энергии и импульса при взаимодействии излучения с веществом, проявляющееся в фотоэлектрическом эффекте и эффекте Комптона, находит адекватное выражение в выдвинутой Эйнштейном идее световых квантов... Такая ситуация ясно показывает невозможность причинного пространственно-временного описания световых явлений" [1, с. 32]. К аналогичному заключению Бор пришел и в отношении природы частиц вещества.

Корпускулярная и волновая картины, взаимно исключаящие друг друга, также должны были использоваться совместно при интерпретации эмпирического материала. Об этом четко и определенно впоследствии скажет В. Гейзенберг: "Бор советовал применять обе картины. Их он назвал дополнительными. Обе картины (корпускулярная и волновая. – И.А.), естественно, исключают друг друга, так как определенный предмет не может в одно и то же время быть и частицей (т.е. субстанцией, ограниченной в малом объеме), и волной (т.е. полем, распространяющимся в большом объеме). Но обе картины дополняют друг друга. Если использовать обе картины, переходя от одной к другой и обратно, то в конце концов получится правильное представление о примечательном виде реальности, который открывается в наших экспериментах с атомами" [17, с. 29].

В только что приведенных словах Гейзенберга антиномия "корпускула – волна" рассматривается исключительно в пространственно-временном аспекте, как это делается большинством авторов, анализирующих проблему дуализма. Позиция Бора в отношении этой антиномии была гораздо более сложной. С одной стороны, Бор как будто был склонен отождествлять волновой аспект микрообъектов с пространственно-временным способом их описания, а корпускулярный – с энергетически-импульсным (причинным), что можно видеть из его разъяснения способа разрешения корпускулярно-волновой дилеммы в отношении света. Об этом как будто свидетельствуют и его замечания, что "физиче-

ское содержание идеи световых квантов целиком связано с законами сохранения энергии и импульса" и что идея индивидуальности частиц, "отвечая требованию причинности, выходит за пределы пространственно-временного описания" [1, с. 36]. С другой стороны, Бор недвусмысленно заявляет, что "в конце концов интерпретация экспериментальных фактов осуществляется с помощью таких абстракций, как излучение в свободном пространстве и свободные материальные частицы. На этих абстракциях покоится, следовательно, все наше пространственно-временное толкование физических явлений" [1, с. 45; см. также с. 33]. Из этих слов очевидно, что пространственно-временной способ описания подразумевает использование как волнового аспекта излучения, так и корпускулярного аспекта вещества.

Таким образом, наша попытка приписать Бору однозначное универсальное связывание корпускулярности с энергетически-импульсными характеристиками, а волновой природы – с пространственно-временными искажила бы его взгляды. Жесткая связь корпускулярности (лучше сказать – дискретности, прерывности) с энергетически-импульсным способом описания имеет место, согласно Бору, только по отношению к световым квантам. Кванты света "не могут рассматриваться как частицы, которым можно было бы приписать точно определенный путь в смысле обычной механики" [1, с. 113]. Но можно ли сказать, что волновой аспект (выражающий непрерывность) жестко связан с пространственно-временным способом описания только по отношению к "волнам материи"?

При ответе на этот вопрос крайне важно иметь в виду, что Бор, следуя своим старым убеждениям, никогда не придавал световым квантам и электронным волнам такого же статуса, как частицам вещества и электромагнитным волнам. Так, в 1931 г. он писал: "...Физики в наши дни толкуют об электронных волнах и о фотонах... Но я думаю, мы все согласимся, что такие понятия, как бы плодотворны они ни были, не могут никогда представлять что-либо большее, чем удобное средство выражения следствий квантовой теории, которые не могут быть представлены обычным образом. Не следует забывать, что

только классические идеи материальных частиц и электромагнитных волн имеют недвусмысленную область применимости, между тем как понятия фотона и электронных волн его не имеют. Их применение существенно ограничивается случаями, в которых, учитывая существование кванта действия, невозможно рассматривать наблюдаемые явления как независимые от приборов, применяемых для их наблюдения" [1, с. 73-74].

Аналогичная мысль высказана Бором более развернуто в 1932 г.: "Чрезвычайная плодотворность волновой картины в объяснении поведения электронов не должна заставлять нас забывать, что здесь отсутствует полная аналогия с распространением обычной волны в материальных средах или с передачей энергии электромагнитных волн через пустое пространство. Точно так же, в случае квантов излучения, часто называемых "фотонами", здесь мы имеем дело с символами, полезными для формулирования вероятностных законов, управляющих элементарными процессами, которые не могут быть проанализированы на основе идей классической физики. В этом смысле такие выражения, как "корпускулярная природа света" или "волновая природа электронов", неопределенны, поскольку понятия частицы и волны строго определены лишь в классической физике, где свет и электроны представляют собой соответственно электромагнитные волны и материальные частицы" [1, с. 96].

На основании этих высказываний можно сделать вывод, что дополнительность волновой и корпускулярной картин имеет иной характер, нежели дополнительность пространственно-временного и энергетически-импульсного способов описания. Жестких параллелей между этими двумя видами дополнительности установить нельзя.

В своей первой статье Н. Бор указывает еще на один случай дополнительности, имеющий место в квантовой теории – на дополнительность волновой и матричной формулировок квантовой механики. По его словам, "волновая механика, как и матричная теория, представляет собой символическое толкование проблемы движения в классической механике, приспособленное к требованиям квантовой теории и поддающееся интерпретации только при явном ис-

пользовании квантового постулата... Можно сказать, что обе формулировки проблемы взаимодействия являются дополнительными в том же самом смысле, как волновое и корпускулярное представления в описании свободных объектов" [1, с. 44].

Отложив дальнейшее обсуждение вопроса о соотношении между различными типами дополненности до следующего параграфа, вернемся к корпускулярной и волновой картинам.

При всей своей определенности понятия электромагнитной волны и материальной частицы были *классическими* понятиями. Поэтому их применение к интерпретации *квантовых* явлений было столь же ограниченным, как и применение понятий светового кванта и электронной волны. Бор ясно видел, что как корпускулярная, так и волновая картины вещества и излучения были "скорее двумя различными попытками интерпретации экспериментального материала, в которых ограниченность классических понятий находит взаимно дополняющее выражение" [1, с. 32]. Иными словами, эти картины были результатом попыток отобразить новую, неклассическую физическую реальность с помощью классических понятий. То же самое можно сказать и о пространственно-временной и энергетически импульсной картинах. В связи с этим встают вопросы о специфике неклассической физической реальности и о том, насколько неизбежно использование классических понятий для построения ее картины. К обсуждению взглядов Бора на эти проблемы мы сейчас и перейдем.

2. Дальнейшее развитие Н. Бором идеи дополненности

Трактат Бором квантовомеханической реальности. Полемика с А. Эйнштейном. Как уже отмечалось выше, невозможность произвольного уменьшения взаимодействия измерительных средств с наблюдаемым объектом, символизировавшаяся конечностью и неделимостью планковского кванта действия, делала невозможным придание самостоятельной реальности наблюдаемому объекту – "явлению", как называл его тогда Бор. Самостоятельной реаль-

ностью, очевидно, обладал лишь процесс взаимодействия объекта и средств наблюдения, т.е. сам акт наблюдения, рассматриваемый как индивидуальный целостный процесс.

Но трактовка наблюдения как взаимодействия наблюдаемого объекта (явления) и средств наблюдения предполагает, что объект и средства наблюдения отличны друг от друга. Более того, знание, полученное в результате наблюдения, всегда в конечном счете относится именно к наблюдаемому объекту, несмотря на то обстоятельство, что "понятие наблюдения, вообще говоря, включает в себя некоторый произвол, так как оно зависит от того, какие объекты включаются в систему, подлежащую наблюдению" [1, с. 31]. Бор любил иллюстрировать это на простом житейском примере с тростью: если человек использует ее для ориентировки в темноте и держит крепко, то она выполняет функцию инструмента наблюдения – при ударе о различные предметы будет казаться, что чувство осязания находится в конце трости, а не в держащей ее руке. Если же трость просто держать свободно, то она будет восприниматься как объект наблюдения – чувство осязания сосредоточится в держащей ее руке [1, с. 60; см. также: 18, с. 21, 308].

Необходимость отнесения результата наблюдения к наблюдаемому объекту, очевидно всегда предполагает подразделение процесса наблюдения. В то же время квантовый постулат требует рассматривать процесс наблюдения как целостный и неделимый. Отсюда и вытекает "дополнительный характер описания атомных явлений, который выступает как неизбежное следствие противоречия между квантовым постулатом и разграничением объекта и средства наблюдения, свойственным самой идее наблюдения" [1, с. 40].

Это противоречие разрешается указанием на то, что исключаящие друг друга и поэтому кажущиеся противоречивыми дополнительные характеристики объекта наблюдения (явления) всегда получаются с помощью применения исключających друг друга средств наблюдения (приборов), т.е. в разных актах наблюдения. Например, "каждое измерение, преследующее цель упорядочить элементарные частицы в пространстве и времени, приводит к отказу от позна-

ния обмена энергией и импульсом между частицами и масштабами и часами, использованными в качестве системы отсчета. Подобным же образом любое определение энергии и импульса частиц приводит к отказу от прослеживания их в пространстве и во времени" [1, с. 68].

Итак, при интерпретации результатов наблюдений, согласно Бору, имеет место следующая ситуация. Несмотря на то, что каждый процесс наблюдения имеет целостный индивидуальный характер, окончательный его результат всегда интерпретируется как некоторая характеристика объекта наблюдения. Роль средств наблюдения, характеристики которых явно не входят в результат наблюдения, сводится при этом к тому, что разные средства, будучи примененными к одному и тому же объекту, дадут в итоге разные характеристики этого объекта, разные его картины. Поэтому можно сказать, что характеристики средств наблюдения все же входят в итоговое знание об объекте, но не в форме знаний о свойствах этих средств, а в виде специфики знания о свойствах объекта. Иными словами, специфика средств наблюдения опредмечивается в специфике знания об объекте наблюдения, воплощаясь в специфике тех свойств, которые приписываются объекту.

В итоге оказывается, что "ни один результат опыта, касающегося явления, в принципе лежащего вне области классической физики, не может быть истолкован как дающий информацию о независимых свойствах объектов (свойствах объектов самих по себе)" [1, с. 283]. Это означает "существенное ограничение понятия объективно существующего явления в смысле явления, независимого от способов его наблюдения" [1, с. 115], что в конечном счете влечет за собой "радикальный пересмотр наших взглядов на проблему физической реальности" [1, с. 182]. Если в классической физике элементами реальности были объекты, то в квантовой механике в роли элементов физической реальности выступают акты взаимодействия объекта с прибором, т.е. процессы наблюдения. Именно их целостность символизируется неделимостью кванта действия, именно она приводит к необходимости дополнительных картин объекта "как такового", которые, будучи неявно зависимыми от средств наблюдения, играют

роль "объективных аналогов" соответствующих актов наблюдения и не могут быть квалифицированы как картины "объекта самого по себе".

Новая трактовка физической реальности была сформулирована Н. Бором в самой первой статье, излагавшей концепцию дополнительности. В дальнейшем эта концепция уточнялась в отдельных деталях, не затрагивающих сути взглядов Бора. В последующих его работах отчетливо видно, как "аргументация постепенно становится яснее, особенно в отношении более четкой терминологии" [1, с. 515]. Пожалуй, самым главным было уточнение смысла, вкладываемого в термин "явление".

В статье "квантовый постулат и новейшее развитие атомной теории", уже имея в виду новое понимание физической реальности и противопоставляя его классическому, Бор "по инерции" все еще продолжал говорить о средствах наблюдения как о внешних по отношению к изучаемым явлениям. Такая терминология давала возможность рассматривать процесс измерения (наблюдения) как возмущение, изменение исследуемых явлений, вмешательство в их ход благодаря воздействию на них средств наблюдения. Поэтому можно было предполагать, что явления все же обладают самостоятельной реальностью, имея собственные независимые от приборов характеристики, и лишь несовершенство средств наблюдения препятствует получению знаний о них как "самих по себе". В тесной связи с этой имплицитной парадигмой находилась трактовка соотношений неопределенностей как соотношений неточностей (погрешностей) измерения, допустимая только в том случае, если исследуемый микрообъект "сам по себе" обладает точными значениями своих характеристик.

Терминология, согласно точному смыслу которой явления были тождественны с исследуемыми объектами и процессами, существуя "в себе и для себя", вне средств наблюдения, сохранялась у Бора вплоть до опубликования знаменитой статьи Эйнштейна, Подольского и Розена, в которой было сформулировано и доказано утверждение о неполноте квантовомеханической картины реальности. Так, в 1930 г. Н. Бор писал: "Старый философский вопрос об объективном существовании явлений независимо от наших наблюдений ставится со-

всем в иной плоскости... каждое наблюдение требует вмешательства в ход процесса...". "Невозможно проследить путь индивидуального светового кванта, не нарушая существенно самого исследуемого явления" [1, с. 69, 113], – развивает он те же мысли в 1932 г., по-прежнему считая тождественными явления и наблюдаемые объекты и помещая их не только вне средств наблюдения, но, как можно было понимать, даже вне самого акта наблюдения.

Доказательство неполноты квантовомеханического описания реальности, данное Эйнштейном, Подольским и Розеном, существенно основывалось на классическом предположении о фундаментальном гносеологическом противопоставлении наблюдаемых объектов (явлений) и актов их наблюдения. Физически реальными считались при этом исключительно характеристики объектов, рассматриваемые безотносительно к возмущениям, обусловленным наблюдениями. Это проявлялось уже в формулировке авторами статьи критерия физической реальности: "Если мы можем без какого бы то ни было возмущения системы предсказать с достоверностью... значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий этой физической величине" [14, с. 605]. Позднее Эйнштейн выразит это предельно четко: "Существует нечто вроде "реального состояния" физической системы, существующего объективно, независимо от какого бы то ни было измерения и наблюдения" [14, с. 624].

Исходя из такого исключительно объектного понимания физической реальности, авторы статьи и приходили к неумолимому выводу о неполноте ее квантовомеханической картины. Рассмотрев взаимодействие двух квантовых систем, они показали, что спустя значительное время после этого взаимодействия "в результате двух различных измерений, произведенных над первой системой, вторая система может оказаться в двух разных состояниях... С другой стороны, так как во время измерения эти системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций над первой системой во второй системе уже не может получиться никаких реальных изменений" [14, с. 608]. Эти два состояния характеризуются, соответственно, координатой и импульсом, ко-

торые не могут быть одновременно приписаны физическим объектам, согласно основным принципам квантовой механики. Но вывод об их одновременной реальности был получен также на основании этих принципов. Очевидное противоречие А. Эйнштейн разрешил, указав на неполноту квантовомеханической картины реальности, которая не может отобразить одновременную реальность дополнительных физических величин.

Эйнштейн ясно осознавал, что такого выводы можно избежать, если настаивать на том, "что две или больше физических величины могут одновременно считаться элементами реальности *только в том случае, если их можно одновременно измерить*" [14, с. 610]. Но это ставило характеристики реальности второй системы, как указывал А. Эйнштейн, "в зависимость от процесса измерения, производимого над первой системой, хотя этот процесс никоим образом не влияет на вторую систему. Никакое разумное определение реальности не должно, казалось бы, допускать этого" [14, с. 610-611].

Поскольку в эйнштейновском примере взаимодействия средств наблюдения со второй системой не происходило, все прошлые аргументы Бора о целостности процесса наблюдения, казалось, повисали в воздухе. Это и вынудило его, как он впоследствии вспоминал, "более подробно и непосредственно затронуть вопросы терминологии" [1, с. 430].

Бор согласился с Эйнштейном, что "нет речи о том, чтобы в течение последнего критического этапа процесса измерения изучаемая система подвергалась какому-либо механическому возмущению. Но и на этом этапе речь идет по существу о возмущении в смысле *влияния на самые условия, определяющие возможные типы предсказаний будущего поведения системы...* Эти условия составляют существенный элемент описания всякого явления, к которому можно применять термин "физическая реальность" [1, с. 187-188]. Они представляют собой не что иное, как типы экспериментальных установок, которые несовместимы для случаев измерения дополнительных физических величин.

С помощью такой, пока еще довольно неуклюжей, терминологии Бор хотел сказать, что вторая система в эйнштейновском примере входит в два разных

явления, поскольку первая система, с которой она когда-то взаимодействовала, измеряется с помощью приборов различного типа. В этих двух явлениях характеристики второй системы и получают свою реальную определенность, которая детерминируется типом прибора, используемого для измерения характеристик первой системы. Это возможно благодаря тому, что после своего взаимодействия обе системы остаются зависящими друг от друга, вопреки эйнштейновскому требованию "существования вещей в некоторый определенный момент времени независимо друг от друга, поскольку они "находятся в различных частях пространства" [14, с. 614].

Изменение терминологии, предпринятое Н. Бором, сначала было незаметным – термины остались прежними, изменился только вкладываемый в них смысл. Ранее Бор считал явлением исследуемый атомный процесс (объект), помещая средства наблюдения (измерительные приборы) вне его, а под измерением понимал процесс взаимодействия явлений с находящимися вне их средствами наблюдения. С 1935 г. он проводит различие между объектами и приборами уже внутри явления. Сначала это явно не оговаривается и выражается нечетко. В формулировках вроде "взаимодействие (объекта и прибора) ...оказывает большое влияние на ход изучаемого явления"[1, с. 206] или "взаимодействие между данными атомными объектами и измерительными приборами, необходимыми для определения явлений..." [1, с. 261], еще трудно однозначно усмотреть изменение смысла термина "явление". Сам Н. Бор, вспоминая о своих возражениях, сделанных Эйнштейну в 1935 г., писал в 1949 г.: "Я глубоко сознаю неудовлетворительность и неуклюжесть выражения моих мыслей и чувствую, что эти недостатки изложения должны были сильно затруднить понимание хода моих рассуждений" [1, с. 427].

Лишь в 1946 г. Бор достигает надлежащей словесной точности, недвусмысленно указывая, что "под словом "явление" следует просто понимать полное описание как экспериментального устройства, так и наблюдаемых результатов [1, с. 383]. Через два года он несколько меняет определение, делая акцент на целостность наблюдения: "В качестве более удачного способа выражения

можно усиленно рекомендовать использовать слово *явление* в более узком смысле, относя его исключительно к таким наблюдениям, которые проводятся в специальных условиях, позволяющих получить полное описание всего эксперимента в целом" [1, с. 397].

К этому же времени относится уточнение позиции Н. Бора в отношении влияния измерения на исследуемые процессы. Если раньше он говорил о вмешательстве наблюдения в ход процесса, отождествляемого с явлением, то теперь он отмечает, что "вследствие использования выражений типа "возмущение явлений посредством их наблюдения" – фразы одинаково непримиримой с любым недвусмысленным значением самих слов "наблюдение" и "явление"" [1, с. 383] – возникают недоразумения. Эти выражения создают упоминавшуюся выше возможность мыслить элементы квантовомеханической реальности (явления) обладающими определенностью своего существования, независимой от наблюдения.

Бор предостерегает против возможного неправильного понимания гейзенберговских соотношений неопределенности. Оно легко может возникнуть, когда все их содержание "пытаются изложить фразой типа "положение и импульс частицы не могут быть одновременно измерены с произвольной точностью". Такое высказывание наводит на мысль, что здесь все дело в добровольном отказе от измерения одного из двух четко определенных атрибутов объекта, и оставляет место для надежд на то, что в будущей, более полной теории оба этих атрибута будут приниматься в рассмотрение в соответствии с требованиями классической физики. Однако ...ситуация в атомной физике в целом лишает всякого смысла такие самостоятельные атрибуты, взятые из арсенала классической физики" [1, с. 207].

Классические понятия и квантовая механика. Но раз понятия классической физики оказываются лишенными смысла, то не лучше ли совсем отказаться от них, чем пытаться приспособливать заведомо неадекватные классические представления к чуждому им кругу атомных явлений? Ведь уже в статье "О строении атомов и молекул" по квантовой физике (1913 г.) Бор сделал выводы,

что "классическая электродинамика, очевидно, неприменима для описания поведения систем атомных размеров" [9, с. 85], что "при расчете движения электронов обычная механика теряет свою абсолютную применимость" [9, с. 90], в результате чего "естественно не может быть и речи о механическом обосновании приведенных в этой работе расчетов" [9, с. 96].

Стремление показать глубокое отличие прежних, классических, и новых, квантовых, представлений было характерно для начальной стадии исследований Бора по квантовой теории атома. В декабрьской лекции 1913 г. Бор специально подчеркивал этот момент: "Я хотел бы выразить надежду, что я выражался достаточно ясно, и вы поняли то резкое противоречие между изложенными соображениями и поразительно гармоничным кругом представлений, которые называют классической электродинамикой" [9, с. 167].

Однако в той же самой статье, где Бор отмечал непригодность обычных механических и электродинамических представлений, он продолжал применять их, хотя и в ограниченной степени. Его первый постулат начинался с указания, что "динамическое равновесие системы в стационарных состояниях можно рассматривать с помощью обычной механики" [9, с. 90]. С электродинамикой дело обстояло сложнее. "Только в одном пункте мы можем ожидать связи с нашими обычными представлениями, – писал Бор. – Можно ожидать, что излучение длинных электромагнитных волн может быть вычислено согласно классической электродинамике" [9, с. 162], поскольку "частота излучения, испускаемого при переходе системы между последовательными стационарными состояниями, совпадает с частотой обращения электрона в области больших длин волн" [9, с. 96].

Последние слова представляют собой первое проявление того способа мышления, который в дальнейшем получит свое обоснование и развитие в принципе соответствия, исследованию которого посвящена глава VII данной книги. Здесь мы ограничимся лишь указанием на то обстоятельство, что благодаря принципу соответствия "стало возможным – несмотря на фундаментальные различия между обычной теорией электромагнитного излучения и идеями

квантовой теории – дополнить определенные выводы, основанные на квантовой теории, другими выводами, основанными на классической теории излучения" [9, с. 285]. Таким образом, принцип соответствия, в котором, как впоследствии ретроспективно вспоминал Бор, "выражена попытка сохранения классического описания до предельной степени, совместимой с индивидуальностью атомных процессов" [1, с. 537], можно рассматривать как аналог-предшественник концепции дополнительности, требующей классического характера взаимно исключающих картин атомной реальности. Подобно тому как принцип соответствия давал возможность "рассматривать квантовую теорию как рациональное обобщение представлений, лежащих в основе обычной теории излучения" [9, с. 311], принцип дополнительности стал рассматриваться "как рациональное обобщение самого классического идеала причинности" [1, с. 397], состоящее в расщеплении единой классической причинности на два дополнительных аспекта [1, с. 102].

Итак, использование классических понятий в квантовой механике, на котором настаивает принцип дополнительности, уходит своими корнями в принцип соответствия, формулирование которого знаменует начало второго этапа в творчестве Бора. На этом этапе Бор смягчает резкость противопоставления квантовых и классических понятий и переходит к осторожному применению последних.

Успешная работа с принципом соответствия, которую Ван дер Варден называет "систематическим угадыванием" [16, р. 8], в конце концов привела Бора к убеждению, что "любое описание природы должно быть основано на использовании представлений, введенных и определенных классической теорией. В связи с этим встает вопрос о возможности представления квантовой теории в такой форме, чтобы это использование классических представлений оказалось свободным от противоречий" [9, с. 482].

Только что приведенные слова Бора взяты из его обобщающей статьи "О применении квантовой теории к строению атома" (1922 г.). В ней он проанализировал тогдашнее состояние квантовой теории. Полезно сравнить эту точку

зрения Бора с той, которую он высказал в 1918 г., т.е. относящуюся ко времени написания предыдущей обобщающей статьи. Тогда Бор, констатируя фундаментальные трудности, возникающие в связи с "радикальным отказом от обычных представлений механики и электродинамики, содержащимися в основных принципах квантовой теории" [19, р. 96], высказал явное сожаление по поводу того, что "до сих пор не удалось заменить эти представления другими, образующими такую же последовательную и развитую систему" [19, р. 96]. Таким образом, в 1918 г. Бор все еще надеялся *заменить* классические представления квантовыми, поскольку ограниченное использование первых в рамках принципа соответствия не приводило к желаемым результатам. В 1922 г. Бор, подчеркивая, что понятия классической электродинамики являются "единственным средством для определения принципов, лежащих в основе применений квантовой теории" [9, с. 518], ставит вопрос уже не о замене, а о *согласовании* классических и квантовых понятий.

Первые успехи в этом согласовании Бор видел в принципе соответствия и в адиабатическом принципе. "Эти принципы, хотя они формулируются с помощью классических понятий, должны рассматриваться исключительно как квантотеоретические законы", – писал он по этому поводу [9, с. 525].

Примечательно, что в том же 1922 г. Бор впервые обсуждает вопрос о возможности объяснения одного и того же явления с разных сторон, т.е. по сути дела потенциально формулирует концепцию дополненности в связи с проблемой природы излучения. Однако такая возможность, как уже отмечалось выше, тогда не рассматривалась Бором как удовлетворительное решение, так как он искал *единую* картину явлений, понимавшихся тогда исключительно в объектном плане, вне процесса наблюдения.

Как зародыш концепции дополненности можно рассматривать и сомнения относительно возможности причинного описания в пространстве и времени, впервые высказанные Ричардсоном и поддержанные Бором в его статье, написанной совместно с Крамерсом и Слетером.

Утверждение об обязательности классических понятий и квантовой теории, которое Бор сформулировал в 1922 г., было повторено в 1924 г. Связь квантовой теории Бора – Крамерса – Слетера "с обычным непрерывным описанием макроскопических явлений" [9, с. 541] рассматривалась Бором как преимущество по сравнению с обычным изложением принципов квантовой физики. В то время, не сомневаясь в необходимости применения классических понятий и уже подразделив их на пространственно-временные и причинные, Бор колебался лишь в выборе между последними группами. В статьях, непосредственно предшествующих изложению концепции дополнительности, он, излагая работу В. Гейзенберга по матричной механике, не забывает отметить, что "весь аппарат квантовой механики можно рассматривать как точную формулировку тенденций, заключенных в принципе соответствия" [1, с. 23]. Поэтому "можно надеяться, что эта формулировка поможет преодолеть затруднения, связанные с применением механических представлений", поскольку она стремится "к точной формулировке соответствия между классической механикой и квантовой теорией" [1, с. 22, 25].

Поэтому высказанное в начале статьи Бора о дополнительности требование интерпретировать эмпирический материал с помощью классических понятий, несмотря на их ограниченную применимость, не выглядит неожиданным. Оно возникло в результате долгих теоретических разработок. Однако это требование все еще не получило достаточных обоснований.

Действительно, такие императивные высказывания Бора, как, например, "по самой сущности физического наблюдения все результаты окончательно должны выражаться с помощью классических понятий, без кванта действия" или "мы должны осознать, что недвусмысленное истолкование любого измерения должно быть по существу выражено в терминах классических теорий" [1, с. 57, 74], никоим образом нельзя рассматривать как обоснование применения классических понятий, несмотря на апелляцию к существу дела. Правда, Бор считал, что "доводом полезности применения таких понятий вне пределов области применимости классической физики является требование непосредствен-

ного перехода квантовотеоретического описания в обычное в тех случаях, когда можно пренебрегать квантом действия", т.е. принцип соответствия, а также упоминал о "нашей потребности в наглядности" [1, с. 66], но это явно не могло считаться достаточным.

Такое положение сохранялось вплоть до 1937 г., когда Бор сделал первый шаг к обоснованию применимости классических понятий в квантовой физике, отметив, что "уже само требование, чтобы обстоятельства опыта и результаты измерения могли быть сообщены кому угодно, означает, что мы можем говорить на языке обычных понятий, основанных на нашем опыте" [1, с. 208]. Эта мысль вскоре получает дальнейшее развитие: "Мы должны прежде всего отдать себе отчет в том, что цель всякого физического опыта есть получение данных при воспроизводимых и поддающихся словесной передаче условиях. Эта цель не оставляет нам никакого другого выбора, как пользоваться повседневными понятиями, может быть улучшенными терминологией классической физики, не только при описании устройства и работы измерительных приборов, но также и при описании получаемых экспериментальных результатов" [1, с. 282]. В 1948 г. Бор приходит к отточенной формулировке: "Как бы далеко ни выходили квантовые эффекты за пределы возможностей анализа классической физики, описание экспериментальной установки и регистрация результатов наблюдения всегда должны производиться на обычном языке, дополненном терминологией классической физики. Это есть простое логическое требование, поскольку слово "эксперимент" в сущности может применяться лишь для обозначения такой ситуации, когда мы можем рассказать другим, что мы сделали и что узнали в итоге" [1, с. 392-393]. С незначительными вариациями это требование, которое А.З. Петров предложил в 1966 г. назвать "принципом Бора" ввиду его принципиальной важности для любой области физики [20, с. 188], воспроизводится впоследствии Н. Бором почти без изменений [1, с. 406, 486, 501, 509, 528, 603].

Итак, начиная с 1948 г., проблема соотношения классических и квантовых понятий получила окончательное решение, и "гармоническое единство квантовых и классических черт теории строения атома" [1, с. 260] стало обос-

нованным. Если излагать взгляды Бора на решение этой проблемы не в исторической последовательности, а в логической, то получается следующая картина.

Поскольку результаты наблюдений должны быть сообщены другим людям, то это требование вынуждает использовать обычный естественный язык, уточненный с помощью понятий классической физики. Исходным в обосновании *физического* требования, таким образом, является *социальное* требование общения, коммуникации.

Следующий, второй шаг состоит в признании постулата неделимой целостности процесса наблюдения, символизируемой квантом действия. Это – типично неклассическое представление, *ограничивающее* пределы применения классических понятий, неизбежного в силу требования коммуникативности.

Третий шаг – в необходимости гносеологического подразделения процесса наблюдения на наблюдаемый объект и средства наблюдения (приборы). Описание последних также требует классических понятий.

Четвертый, последний шаг – отнесение информации о целостном акте наблюдения, воплощенной в его результате, к наблюдаемому объекту. При этом классичность описания средств наблюдения и его результата приводит к тому, что наблюдаемый объект также описывается в классических понятиях, соответствующих типу примененного средства наблюдения. Поскольку же использование некоторых типов приборов исключает друг друга, картины объекта, выраженные в соответствующих наборах классических понятий, также исключают друг друга, представляя собой дополнительные картины. Лишь в совокупности они исчерпывают информацию о наблюдаемом объекте. Указанное взаимное ограничение применимости классических понятий находит свое количественное выражение в соотношениях неопределенностей.

Очень часто, однако, принцип дополненности трактуется либо как синоним соотношений неопределенностей (см., например: [21, с. 77-78]), либо даже как логически и исторически вытекающий из них (см., например: [22, с. 35; 23, с. 19]). М. Джеммер указывает на ошибочность такого рода воззрений, справедливо отмечая, что "соотношения неопределенностей Гейзенберга были

для Бора скорее подтверждением представлений, к которым он пришел задолго до того, как Гейзенберг получил свой принцип на основе теории преобразований Дирака – Иордана. На самом деле работа Гейзенберга лишь побудила Бора придать своим мыслям о дополнительной последовательную и законченную формулировку" [10, p. 345].

Действительно, о необходимости использования классических понятий для описания микрообъектов Бор говорил уже в 1922 г. Представления об ограниченности классической механики и электродинамики вследствие неустранимой прерывности и дискретности атомных процессов возникли у него в 1913 г. Вопрос о возможности объяснения одного и того же явления с разных сторон обсуждался Бором также в 1922 г. Переход от этих элементов концепции дополнительной к ее полной формулировке произошел в два этапа.

Первый этап состоял в признании корпускулярно-волнового дуализма (т.е. в реализации возможности, которая в 1922 г. казалась Н. Бору половинчатым решением проблемы). Это признание было довольно длительным процессом, но, как вспоминал Гейзенберг, Бор "еще в Норвегии... сжился с понятием дополнительной, которое позволяло рассматривать дуализм волн и частиц в качестве исходного пункта интерпретации" [24, с. 18]. Таким образом, это произошло до того, как Гейзенберг показал Бору свой первый вариант статьи о принципе неопределенности вместе с комментариями В. Паули [25, с. 59]. Но после этого концепции дополнительной не хватало еще одного существенного элемента – применения "квантового постулата" к акту наблюдения.

Это применение составляет второй, последний, этап окончательного формулирования концепции дополнительной. По всей видимости, именно в этом принцип неопределенности оказал решающее влияние на Бора в ходе нескольких недель довольно напряженных дискуссий с Гейзенбергом. Впоследствии Бор вспоминал, что "прояснить положение вещей можно было ...только путем более глубокого исследования проблемы наблюдений... Эта фаза развития была, как известно, начала в 1927 г. Гейзенбергом" [1, с. 405]. В свою очередь В. Гейзенберг пишет об этом так: "Мы, не без содействия Оскара Клейна,

признали, что в основе наши точки зрения не расходятся и что соотношение неопределенностей представляет собой лишь частный случай принципа дополнительности" [24, с. 18, 303-305].

3. Полемика вокруг принципа дополнительности

В 1955 г. Дж. Уилер заметил, что "вследствие своей тонкости идея дополнительности распространяется медленно" [4, р. 375]. Справедливость этого замечания особенно ярко иллюстрируется реакцией участников конгресса 1927 г. в Комо на доклад Бора, впервые изложившего суть дополнительного способа мышления. Выступившие в обсуждении доклада Бора: Борн, Крамерс, Гейзенберг, Ферми и Паули, хотя и не выдвинули никаких возражений, но совершенно не затронули его реальной проблематики [10, р. 354]. Л. Розенфельд, который впоследствии стал одним из самых ревностных сторонников концепции дополнительности, признавался в 1963 г., что в лекции Бора он "не увидел и не почувствовал ни одного из тонких моментов, содержащихся в ней" [10, р. 354]. Я.И. Френкель, советский участник конгресса в Комо, в своем отчете ни словом не упомянул о дополнительности [26, с. 247-258].

М. Джеммер указывает, что часть трудностей, препятствовавших распространению концепции дополнительности, несомненно, была обусловлена некоторой расплывчатостью выражений, использовавшихся ее сторонниками (и прежде всего Бором), особенно на первых этапах становления этой концепции [10, р. 356]. Подтверждение этому можно увидеть, например, в словах Эйнштейна, признававшегося, что он, несмотря на все свои усилия, так и не смог получить точной формулировки принципа дополнительности [27, с. 302]. Л. де Бройль, называя Бора "Рембрандтом современной физики", также замечал, что его очень тонким и весьма интересным соображениям не хватает убедительности из-за присущего Бору определенного вкуса к "светотени" [28, с. 25, 27-28]. Последнее слово здесь, очевидно, служит изящным эквивалентом "расплывчатости".

Основной пункт критики. Существует, однако, гораздо более серьезная причина, по которой Эйнштейн и многие другие не могли и не могут принять концепцию дополненности. Она носит фундаментальный философский характер и заключается в несогласии с тем пересмотром взглядов на природу физической реальности, которого требует идея дополненности. В принципиальной невозможности получения знания об атомных объектах "самих по себе" безотносительно к их наблюдениям, провозглашаемой этой концепцией, ее противники видят отказ от идеалов научного познания, уступку субъективизму и идеализму.

Подобным же образом квалифицируется и тесно связанный с концепцией дополненности принципиально вероятностный характер квантовомеханических предсказаний, исключающий саму возможность классически детерминистского "субстрата" микроявлений.

Пожалуй, самой яркой, глубокой и последовательной критикой этих моментов содержания принципа дополненности была и до сих пор остается программа Эйнштейна. Как уже указывалось выше, Эйнштейн понимал суть новых воззрений Бора на природу физической реальности, но категорически не соглашался принять их. Констатируя, что "в рамках статистической квантовой теории таких вещей, как полное описание отдельной системы, не существует" [27, с. 300] и признав, что "эта теория является единственной теорией, логически удовлетворительно объединяющей дуальные (корпускулярные и волновые) свойства материи", он был недвусмыслен в ее оценке. "Принципиально неудовлетворительным в этой теории, на мой взгляд, – писал он, – является ее отношение к тому, что я считаю высшей целью всей физики: полному описанию реального состояния произвольной системы (существующего, по предположению, независимо от акта наблюдения или существования наблюдателя)" [27, с. 296].

Судя по тому, что Эйнштейн до конца своей жизни продолжал приводить против истолкования Бором квантовой механики пример, использованный им в 1936 г. (парадокс Эйнштейна, Подольского, Розена), аргументация Бора была

оставлена им без внимания. Это дало Д. Бому основания утверждать, что обмен мнениями между Бором и Эйнштейном был безрезультатным и что "все обсуждавшие эту проблему обнаруживают тенденцию воспроизводить неудачу в коммуникации между Бором и Эйнштейном" [29]. Занимая противоположные позиции относительно категориальной природы элементов физической реальности, сторонники Эйнштейна настаивают на исключительно объектном характере последней (отождествляя его с объективностью), в то время как сторонники Бора включают в состав реальности и экспериментальные процедуры, рассматривая их наряду с естественными процессами.

Подтвердим сказанное одним примером.

В 1953 г. один из ближайших сподвижников Бора – Л. Розенфельд опубликовал статью "Спор о дополнителности", в которой еще раз объяснил суть концепции Бора и попытался показать необоснованность ее критики с философских позиций [30, р. 393-410]. Снова подчеркнув, что явление следует рассматривать как "неделимое целое, образованное системой и средствами наблюдения" [30, р. 395], он справедливо заметил, что это представляется многим "ставящим под вопрос детерминизм и объективность физических теорий. Вследствие этого к идее дополнителности все еще относятся с подозрением, вопреки ее действительному содержанию" [30, р. 396], заключающемся в "успешном соединении полной объективности описания природных явлений с необходимостью явного учета условий наблюдения" в этом описании. "С диалектической точки зрения, – продолжал Розенфельд, является почти самоочевидным, что та существенная роль, которую играет наблюдатель в определении явлений, полностью созвучна с глубоко материалистической природой науки, ибо для науки материализм представляет собой не что иное, как философское выражение процесса постепенного уточнения нашего мысленного отображения внешнего мира. Сомнения в этом могут возникнуть лишь тогда, когда материализм превращается догматически в некоторую метафизическую систему, и все, что такого рода философия не может себе представить, клеймится как идеалистическое" [30, р. 407].

В 1955 г. под тем же названием "Спор о дополнителности" была опубликована статья М. Бунге [31, с. 413-443], который подверг резкой критике позицию Розенфельда, безоговорочно квалифицировав ее как новейшее проявление консервативной точки зрения официальной философии квантовой теории, носящей существенно позитивистский характер [31, с. 413]. По мнению Бунге, "сторонники учения о дополнителности не делают определенных заявлений о реальном мире, они утверждают, что квантовая механика говорит не о наблюдаемых реальных объектах, а лишь об экспериментальных устройствах" [31, с. 416]. Поэтому дополнителность вне всякого сомнения представляет собой отход от объективности, которая трактуется Бунге исключительно как объектность: для него "объективное" означает "относящееся и принадлежащее к объекту" [31, с. 423]. При таком понимании объективности "относящееся к измерительным устройствам", естественно, будет субъективным, так что главное заключение Бунге о несогласии концепции дополнителности с научным материализмом и ее "согласии с принципами логического эмпиризма, особенно с берклианской теорией познания" [31, с. 442] не выглядит неожиданным.

В своих последующих публикациях и Л. Розенфельд [32, р. 384-388; 33, р. 41-45; 34, р. 42], и М. Бунге [35, р. 195-222; 36, р. 1-6] точно так же, как в свое время Н. Бор и А. Эйнштейн, не изменили своих воззрений.

Философская квалификация принципа дополнителности в советской философской литературе была дана в 1947 г., когда М.А. Марков впервые поставил задачу подвергнуть внимательному анализу принципиальные вопросы квантовой механики и, в частности, выяснить возможность последовательно материалистического истолкования дополнителности [37, с. 142]. Идея дополнителности "есть, если можно так сказать, макроскопическая форма проявления реальности микромира, она является макроскопической формой отражения микромира... Естественно, что макроскопическая форма этой реальности не менее объективна, чем всякая другая" [37, с. 164-165].

По поводу статьи М.А. Маркова разгорелась оживленная дискуссия, и ряд ее участников отвергли идею дополнителности как якобы идеалистическую и

метафизическую. Позднее в работах В.А. Фока [38, с. 154-176; 39] принцип дополнительности истолковывался как не вступающий в противоречие с материалистической диалектикой. За последние 10-12 лет в советской философской литературе прочно утвердилась оценка идеи дополнительности как связанной с наиболее общими законами диалектики [40, с. 53; 41, с. 211-215; 42, с. 296-308].

Эволюция философской оценки принципа дополнительности может быть прослежена на протяжении 25 лет на примере работ отдельных советских физиков и философов (см., например: [43]). Некоторые критики долгое время считали основной идеей концепции дополнительности представление Н. Бора о "неконтролируемом взаимодействии". Говорилось об отказе Н. Бора от этого термина, в связи с чем изменилась и общая критическая оценка всей концепции. Однако небесполезно заметить, что само утверждение об отказе от термина "неконтролируемость" не соответствует действительности – Бор продолжал употреблять его и в 1961 г. [1, с. 578]. Кроме того, если даже Н. Бор изменял терминологию, то суть дополнительного способа мышления оставалась без изменений.

Резюмируя содержание философской полемики вокруг принципа дополнительности, можно сказать, что сам по себе этот принцип не является ни материалистическим, ни идеалистическим, ни субъективистским, ни метафизическим. Его содержание – исключительно логико-методологическое, касающееся способа употребления классических понятий применительно к неклассической области. Материалистическим или идеалистическим может быть лишь философское истолкование этого принципа, которое во многом зависит от причин идеологических и социальных, но отнюдь не определяется собственным содержанием концепции дополнительности. При желании она может быть истолкована в пользу позитивизма (П. Иордан) [44, S. VII-VIII; 45, S. 132] и идеализма (Дж. Джинс) [46, p. 201, 205]. Но из этого следует только то, что подобным истолкованиям должна быть противопоставлена диалектико-материалистическая трактовка принципа дополнительности, в значительной мере уже разработанная в нашей философской литературе.

Попытки преодоления дуализма. Очень часто принцип дополнительности трактуется исключительно в объектном плане. Вот как, например, разъяснял концепцию Бора Л. де Бройль: "Бор говорит, что есть "две дополняющие друг друга стороны действительности": локализация во времени-пространстве и динамическое определение через энергию и количество движения. Это как бы две различные плоскости, на которых мы не можем находиться точно одновременно. Сделаем сравнение. Пусть мы имеем рисунок, некоторые части которого нарисованы на плоскости P , а другие части – на плоскости P' , параллельной и очень близкой к первой. Если мы будем рассматривать этот рисунок при помощи не очень точного оптического инструмента, мы сможем на промежуточной плоскости получить изображение, довольно сходное с рисунком: нам будет казаться, что весь рисунок начерчен на одной и той же плоскости. Но если мы употребим очень точный оптический инструмент, мы не сможем видеть одновременно точки и на P , и на P' ; чем точнее мы будем видеть точку на P , тем большая часть рисунка на P' будет казаться неясной и обратно; в конце концов мы вынуждены будем признать, что рисунок лежит не в одной плоскости. Старая механика была аналогией мало точного инструмента: она нам давала иллюзию возможности точно определять сразу и положение частицы, и ее состояние движения. Но с помощью новой механики, которая аналогична точному инструменту, мы принуждены признать, что локализация в пространстве и времени и точное определение энергетического состояния суть две стороны действительности, которые нельзя точно видеть в одно и то же время" [47, с. 13].

Как дополнительные стороны реальности (в объектном смысле) де Бройль рассматривал также частицы и волны [28, с. 19]. Еще в 1927 г. он предложил программу "теории двойного решения", в которой и частицы, и волны обладали самостоятельной, не исключающей друг друга одновременной реальностью [28, с. 20, 21]. После обнаружения ряда трудностей де Бройль был вынужден примкнуть к "ортодоксальной" интерпретации, которую в душе он не разделял. По его собственным словам, он "долгое время принимал идею дополнительности в области квантовой физики, осознавая в то же время, что она яв-

ляется неадекватной". Позднее, он "стал относиться к концепции дополнительности со все возрастающим подозрением" [48, р. 7].

В начале 50-х годов стимулированный работами Бома, переоткрывшего теорию "волны – пилота" [28, с. 28], де Бройль снова вернулся к своим прежним идеям, считая, что стандартная интерпретация квантовой механики, основанная на идее дополнительности, "не обеспечивает подлинного и убедительного объяснения физической реальности на субмикроскопическом уровне" [48, р. VII], поскольку она "рассматривает фундаментальные элементы света и вещества как протееобразные формы, которые иногда являются нам в виде волн, а иногда – в виде частиц" [48, р. 7].

Вне зависимости от отношения к предложенной де Бройлем альтернативе можно со всей определенностью сказать, что критикуемая им версия концепции дополнительности не отвечает собственным взглядам Бора. Бор никогда не рассматривал ее в чисто объектном смысле – как дополнительные он трактовал *картины* реальности (способы описания, по его терминологии), элементами которой были явления, т.е. экспериментальные ситуации.

Если де Бройль стремится построить чисто объектную картину реальности, в которой на равных правах совместно фигурировали бы как волны, так и частицы, то некоторые другие авторы (также мыслящие всецело в объектном плане) пытаются достигнуть либо чисто волнового, либо чисто корпускулярного представления о реальности, взятой исключительно в форме объекта.

Наиболее выдающимся представителем волнового монизма был Э. Шредингер, который еще в 1926 г. считал, что "материальные точки состоят из систем волн, или даже тождественны с ними" [49, с. 244]. В 1952 г. он снова повторил, что единственной реальностью в физическом мире являются волны, что частиц и квантов энергии на самом деле нет – они суть иллюзии, основанные на неправильной, по его мнению, интерпретации явления резонанса интерферирующих волн [50, pp. 109-123, 233-242]. Аргументированная критика этой позиции была дана М. Борном [51, с. 252-266].

Корпускулярный монизм (в отношении частиц вещества) весьма активно пропагандируется А. Ланде, который, подобно Л. де Бройлю, подверг ревизии свою прежнюю приверженность к концепции дополнительности, обвиняя ее в том, что она "избегает вопроса о реальном строении материи благодаря утверждению о двух противоположных, хотя и дополнительных ее "картинах"" [52, p. 73]. Н. Бор, по мнению А. Ланде, неправомерно "призывает нас заменить эмпирический результат Гейзенберга, касающийся неопределенности предсказания, некой идеологической доктриной неопределенности существования" [53, p. 119], которая "базируется на необоснованном буквальном придании волновых характеристик частицам, представляя собой скорее семантическое ухищрение, нежели разумную физику" [53, p. 120].

В противовес таким образом истолкованной концепции Бора А. Ланде считает, что квантовая теория должна "возвратиться от диалектического позитивизма противоположных картин к ясности онтологического материализма, который со времен Галилея и вплоть до Эйнштейна был идейной основой естествознания" [52, p. 104]. В соответствии с этой философской установкой Ланде считает необходимым "отказаться от представления, что волны материи так же реальны, как материальные частицы", [54, p. 75], поскольку "если серьезно отнестись к статистическому истолкованию (ψ -функции. – И.А.) Борном с помощью частиц, то для "дуализма больше не станется никакого места: волновые явления будут представлять собой просто проявление *реальных* частиц" [52, p. 95].

"Диалог о дуализме", проведенный в 1968 г. между М. Борном и В. Бимом, с одной стороны, и Ланде, с другой [55, p. 55-56] – не привел к переубеждению ни одной из сторон. М. Борн и В. Бим заключили диалог словами: "Конечно, квантовую механику частиц возможно сформулировать так, чтобы исключить все волноподобные термины. Иногда это сделать легко, иногда это выглядит очень искусственно. Поскольку при этом теряется очень много, мы должны спросить: "Для чего все эти усилия?"" [55, p. 56]. Ланде мог бы отве-

тить на это: "Для того, чтобы сохранить единую, чисто объектную картину реальности".

Таким образом в отличие от де Бройля, трактовавшего дополнительную в объектном смысле, Ланде прекрасно понимает, что эта концепция, говоря словами Розенфельда, представляет собой решение не столько онтологической, сколько *логической* задачи: "как нужно поступить в том случае, когда мы встречаемся с такой ситуацией, при которой мы должны использовать два представления, взаимно исключают друг друга, но оба необходимые для полного описания явления" [56, с. 41]. Но он не согласен ни с ее решением, ни даже с ее постановкой как *логической* задачи отображения реальности, взятой в форме деятельности (ср. боровское понимание явления), в форму объекта. Его исключительно объектная методологическая установка препятствует этому.

Руководствуясь подобной установкой, можно "решить" проблему дополнительной волновой и корпускулярной картин реальности еще более радикально, объявив ее псевдопроблемой. Такую цель ставит перед собой М. Бунге, который считает, что "когда скоро квантовая механика является истинной, то в природе нет никакого корпускулярно-волнового дуализма. Поэтому не существует дополнительной волнового и корпускулярного аспектов кроме как на классическом уровне – например, для описания некоторых макроэффектов. Сохранять дополнительную на квантовом уровне означает увековечивать неразбериху" [57, р. 291].

Ход мыслей, приведший к этому выводу, выглядит так. На квантовом уровне существуют специфические объекты – квантоны, которые нельзя описывать классическими понятиями в силу их иной природы. В частности, они не являются ни частицами, ни волнами. Поэтому "дуализм не представляет собой верного ответа, ибо на квантовом уровне существуют не корпускулярные и волновые свойства, а скорее, частицеподобные и волноподобные. Короче говоря, "частицы" и "волны" квантовой механики надо понимать метафорически, а не буквально" [57, р. 235].

В соответствии с таким пониманием квантовомеханической реальности Бунге квалифицирует основанную на концепции дополнительности интерпретацию как "скорее психологическую, нежели физическую" [57, р. 236], поскольку в ней "наблюдатель, обремененный своими намерениями, ожиданиями и неопределенностями, переплетен в запутанном клубке с наблюдаемыми объектами" [57, р. 237]. Физической же, по определению Бунге, теория является только тогда, когда она говорит исключительно об объектах внешнего мира [35, р. 206].

Резюмируя, можно констатировать, что при всем своем разнообразии варианты отказа принять концепцию дополнительности объединены одним общим моментом – чисто объектной трактовкой реальности, отождествляемой с ее объективностью.

Неизбежны ли классические понятия? Апелляция к подлинно квантовым, существенно неклассическим понятиям, должным адекватно отобразить квантовомеханическую реальность, к которой прибегает Бунге, распространена довольно широко. Главный огонь критики в адрес концепции дополнительности под этим углом зрения направляется на "принцип Бора", утверждающий неизбежность классических понятий при интерпретации опытных данных в любой области физики.

Обсуждая парадокс, связанный с ролью классических понятий в интерпретации квантовой теории Бором, которая исходит, с одной стороны, из положения, что мы должны описывать эксперименты в понятиях классической физики, а с другой – из признания, что эти понятия неточно соответствуют природе, Гейзенберг связывал стремление к его преодолению путем отказа от классических понятий с объектной (по его терминологии, "объективной") и лапласовски-детерминистской методологической установкой. Вновь разъясняя "дополнительностные" взгляды на эту проблему, он писал: "Предлагали совсем отказаться от классических понятий, рассчитывая, по-видимому, что радикальное изменение понятий, описывающих эксперимент, приведет к нестатистическому, полностью объективному описанию природы. Однако эти соображения ос-

новываются на непонимании. Понятия классической физики являются хорошо отработанными понятиями нашей повседневной жизни и образуют важнейшую составную часть языка, являющегося предпосылкой всего естествознания. Наше теперешнее положение в естествознании таково, что для описания эксперимента мы фактически используем или должны использовать классические понятия. Иначе мы не поймем друг друга... В этой связи мы должны отчетливо понимать, говоря словами К. Вайцзеккера, что "природа была до человека, но человек был до естествознания". Первая половина высказывания оправдывает классическую физику с ее идеалами полной объективности. Вторая половина объясняет, почему мы не можем освободиться от парадоксов квантовой теории и от необходимости применения классических понятий" [17, с. 35].

Напомним, что к такому пониманию роли классических понятий в квантовой теории Бор пришел не сразу – одно время он надеялся на *замену* классических понятий квантовыми. Любопытно, что подобная эволюция обнаруживается и у некоторых других авторов. Так, В.А. Фок, упрекавший в 1958 г. Бора за то, что его "блестящая демонстрация ограниченности классических понятий не сопровождается хотя бы кратким указанием на то, чем они должны быть заменены" [58, с. 601], впоследствии присоединился к точке зрения Бора, разработав концепцию относительности к классически описываемым средствам наблюдения как основы квантового способа описания явлений [59, с. 193].

Вопрос о роли классических понятий в квантовой теории подвергся подробному обсуждению в 1968 г. на кембриджском коллоквиуме "Квантовая теория и перспективы", труды которого были опубликованы в 1971 г. [60].

Редактор трудов симпозиума Тед Бастин квалифицировал зависимость квантовой теории от классических понятий, зафиксированную в известном парадоксе (квантовая механика "содержит классическую механику как свой предельный случай и в то же время нуждается в этом предельном случае для своего обоснования" [61, с. 16]) как логический круг, и поставил в качестве главной проблемы обоснования квантовой теории преодоление этого недостат-

ка, тесно связанного, по его мнению, с концепцией дополнительности [60, р. 2-3].

От имени сторонников этой концепции К. Вайцеккер попытался показать, что этот парадокс является лишь кажущимся [62, р. 26], еще раз изложив позицию Бора. Однако, несмотря на его усилия, большинство участников коллоквиума склонились к мнению, что "хотя классические способы мышления действительно необходимы в каждом пункте интерпретации квантотеоретического формализма, тем не менее полное понимание квантовой теории должно и может привести нас к некоторому более полному и существенно более точному набору понятий для описания физического мира. С этой точки зрения классический язык не является неизменным, а подвержен изменению, уточнению и развитию" [63, р. 91].

Т. Бастин выразил неудовлетворенность ситуацией, когда "мы мыслим в классических понятиях, которые подразумевают бесконечную делимость материи, выражаем эту подразумеваемость в математических образах пространственного и временного континуумов и в то же время формально имеем дело с дискретной теорией" [64, р. 285]. Это, по его мнению, приводит к тому, что "квантовая теория не объясняет самый главный факт, с которым она имеет дело". – существование атомистичности в мире, которое постулируется независимо [64, р. 285].

Пожалуй, наиболее развернутая критика неизбежности классического языка как в квантовой механике, так и в физике вообще, была дана Д. Бомом, отношение которого к концепции дополнительности претерпело значительное изменение по сравнению с его взглядами 50-х годов.

Как известно, в 1952 г. Бом выдвинул программу интерпретации квантовой теории на основе представления о "скрытых параметрах" [65, с. 34-94]. Эта программа имела целью позволить "рассматривать каждую индивидуальную систему как находящуюся в некотором точно определенном состоянии, изменение которого со временем задается точными законами, похожими на классические уравнения движения (но не идентичными с ними)" [65, с. 35]. Она носи-

ла исключительно объектный и лапласовски-детерминистский характер. Тогда Бом считал, что квантовомеханическая статичность обусловлена *практической* невозможностью предсказания индивидуальных событий, вызванной неконтролируемым (практически) взаимодействием с прибором, т.е. по своей природе она такая же, как и в классической статистической физике [65, с. 45]. *Теоретически* же, утверждал тогда Бом, все процессы следует рассматривать "как принципиально непрерывные и каузальные" [65, с. 53], так что "результат любого индивидуального акта измерения определяется координатами и импульсами отдельных частиц – пока что скрытыми, но в принципе находимыми" [65, с. 73]. Обычная интерпретация Бора квалифицировалась Бомом как точка зрения, "согласно которой в квантовой области недостижимо объективное и точное описание физической реальности" [65, с. 83], т.е. в конечном счете как позитивистская.

Эта программа была явным отрицанием прежней приверженности Бома к взглядам Бора, когда в предисловии к своему учебнику по квантовой теории он заявил, что "лекции Нильса Бора "Атомная теория и описание природы" сыграли решающую роль в общем философском обосновании, необходимом для правильного понимания квантовой теории" [66, с. 11], и вполне адекватно изложил принцип дополнительности [66, с. 193-196].

Воззрения Бома, относящиеся к 1968 г. и подробно изложенные на кембриджском симпозиуме, показывают своеобразное "отрицание отрицания" в отношении к взглядам Бора. К 1968 г. Бом стал полностью разделять главную особенность подхода Бора – "необычайно сильный акцент на внутренней согласованности и последовательности языка" [67, р. 33]. Он справедливо упрекнул большинство физиков (особенно тех, кто руководствуется идеями фон Неймана) за то, что они "продолжают говорить о "квантовой системе" так, как будто бы она состоит из взаимодействующих элементов (например, частиц), которые существуют независимо друг от друга, и из прибора, используемого для "наблюдения квантового состояния системы". Для Бора же характерно то, что он вообще не употребляет подобных языковых форм.

Действительно, его рассуждения подразумевают, что такой способ описания неприменим в квантовом контексте [67, р. 33], в котором "описание экспериментальных условий не отбрасывается как простой промежуточный этап вывода, а остается сплавленным с описанием (как формальным, так и неформальным) того, что именуют наблюдаемым объектом. Это означает, что "квантовый" контекст требует нового способа описания, который не должен проводить потенциального или актуального разделения "наблюдаемого объекта" и "наблюдающего прибора". Вместо этого... форма экспериментальных условий и содержание экспериментальных результатов должны представлять собой единое целое, по отношению к которому неприменимо разложение на разобщенные элементы" [67, р. 37]. В частности, "нет никакого смысла говорить..., что существует "наблюдаемый объект", который взаимодействует со "средством наблюдения"" [67, р. 38].

Единственный, но очень важный пункт, в котором Бом не соглашается с Бором, – убеждение последнего в том, что язык повседневной жизни, уточненный с помощью понятий классической физики, является единственно возможным языком для однозначной коммуникации по поводу результатов эксперимента [67, р. 39]. По мнению Бома, экспериментальные результаты (и условия) следует описывать с помощью новых языковых форм, которые не являются ни классическими, ни квантовыми (в смысле Бора). Он призывает физиков развернуть "движение по свободному исследованию новых форм языка, принимая во внимание весьма важные мысли Бора, но не разделяя догматически его приверженности к обязательности классических языковых форм, ограниченных квантовым алгоритмом" [67, р. 40], которая в конечном счете обосновывает, по Бору, принцип дополнительности [67, р. 38-39].

В качестве одной из таких языковых форм Бом предложил программу, основанную на представлении о "скрытых параметрах", но существенно отличающуюся от программы 1952 г. Принимая во внимание критику в адрес последней и – что случается довольно редко – конструктивно ее учитывая, Бом подчеркнул, что, вопреки прочно установившемуся мнению, использование

"скрытых параметров" вовсе не обязательно является "реакционным" возвратом к методологическим установкам классической физики. В частности, новая программа (впервые реализованная в 1966 г.) [68, р. 453], по словам Бом, представляет собой "продолжение и разработку того наиболее важного и нового, что было достигнуто Бором. Только в том случае, если термин "скрытый параметр" неявно ограничивается смыслом "существенно классически динамический", можно было бы правдоподобно считать скрытые параметры несовместимыми с тем новым, что принесла с собой квантовая теория. На самом же деле, – продолжал Бом, – моей целью является продемонстрировать с помощью специального иллюстративного примера, включающего использование скрытых параметров, нового, нединамического вида, что это понятие действительно может существенно помочь вывести наше мышление от классических понятий и способов описания к радикально новым представлениям не только о форме физического закона, но и о природе деятельности, образующей саму физику" [69, р. 97].

Не вдаваясь в обсуждение новой программы Бом и ее дальнейшей реализации, основанной на теории кохомологии [70, р. 171-183], заметим только, что сам Бом ясно осознает невозможность резкого перехода от одного языка к другому, обладающему существенно отличной общей структурой. Он признает, что "необходима некоторая переходная, "промежуточная" трактовка, в которой мы вводим новые термины постепенно, всякий раз, когда это возможно, соотнося их с соответствующей старой терминологией" [69, р. 103]. Поэтому отказ от классического языка оказывается неабсолютным, ибо все вводимые новые термины необходимо требуют разъяснения, которое в конечном счете может быть дано только на обычном естественном языке повседневной жизни. Какие бы новые языки (способы описания) ни вводились в качестве объект-языка для характеристики объектной области физики, в качестве мета-языка, разъясняющего смысл терминов новых объект-языков и включающего их в процесс коммуникации, всегда остается естественный язык [71, с. 88]. В результате представляется, что Бор все-таки был прав, формулируя принцип, справедливо на-

званный А.З. Петровым его именем, если этот принцип понимать как требование к языку, необходимому для включения знаний об опытных данных в процесс коммуникации.

Разногласия внутри копенгагенской интерпретации. До тех пор критика в адрес различных моментов концепции дополнительности рассматривалась как внешняя, исходящая от противников этой концепции, а взгляды ее сторонников – Бора, Гейзенберга и других – неявно предполагались идентичными. Между тем среди сторонников "копенгагенской" интерпретации квантовой механики имеются довольно существенные расхождения по поводу трактовки отдельных аспектов дополнительного способа мышления [72, p. 221].

В первую очередь эти расхождения касаются *философской* оценки концепции дополнительности. На них мы не будем подробно останавливаться, поскольку, как уже было указано выше, такого рода оценка имеет внешний характер по отношению к собственному содержанию принципа дополнительности, имеющего логико-методологический, а не общепhilosophский характер. Отметим только, что К. Вайцеккер предпочитает оценивать этот принцип в духе Канта [62, p. 28], П. Йордан – в рамках позитивизма [44], а Л. Розенфельд апеллирует к диалектическому материализму [30, p. 399], критикуя В. Гейзенберга за идеализм [30, p. 401]. Спектр оценок убедительно говорит сам за себя (обзор различных философских истолкований см. в книге: [73, с. 337-350]).

Гораздо более существенным с *логико-методологической* точки зрения является различие между взглядами Бора на целостность явлений и трактовкой этих взглядов почти всеми его сторонниками, которые продолжают придерживаться ранней терминологии Бора и говорить о взаимодействии измерительного прибора и микрообъекта так, как будто они имеют самостоятельное существование (см., например: [17, с. 28, 33; 56, с. 47; 51, с. 280, 313]), игнорируя принципиальные замечания Бора на этот счет [1, с. 207, 383]. Это открывает простор для внешней критики с чисто объектных позиций. Как справедливо в данном случае замечает Бунге, "если приборы *обуславливают* неконтролируемые возмущения в состоянии системы, то, следовательно, эта система *существует* в

том или другом состоянии, перед тем как подвергнуться наблюдению" [57, p. 267].

Справедливость, однако, требует сказать, что даже в своих последних статьях Бор не всегда соблюдал собственные предостережения [1, с. 543].

Различным образом освещается сторонниками Бора и вопрос о конкретных типах дополнительных соотношений. Как указывалось выше, сам Бор говорил о трех таких типах – дополнительности пространственно-временного и "причинного" способов описания (как главной, определяющей), корпускулярно-волновом дуализме и дополнительности математических формулировок матричной и волновой механик. Вскоре очень распространенной стала трактовка Паули, который приписывал Бору рассмотрение в качестве дополнительных *отдельных* понятий (координату и импульс, время и энергию) [74, с. 17]. В период вынужденного согласия с Бором де Бройль указывал еще на один тип дополнительности, трактуемый, в его духе, чисто объектно: "В определенном смысле система и ее элементарные составные части составляют дополнительные аспекты реальности, которые объединяются путем противопоставления друг другу" [75, p. 139].

В 1955 г. К. Вайцеккер предложил называть "главную" дополнительность, по Бору, "круговой" [76, S. 294], а дополнительность, в смысле Паули, – "параллельной" [76, S. 284]. В эти названия он вкладывал следующий смысл. Прежде всего, Вайцеккер установил, что "дополнительность между пространственно-временным описанием и требованием причинности... в точности совпадает с дополнительностью между описаниями природы с помощью классических понятий и с помощью ψ -функции" [76, S. 293], поскольку под пространственно-временным описанием следует понимать описание наших экспериментов с помощью классической физики, а под теорией, удовлетворяющей требованию причинности, – шредингеровскую волновую теорию в конфигурационном пространстве [76, S. 330]. Далее он обратил внимание, что эти дополнительные описания находятся в круговом отношении взаимозависимости: для определения волновой функции необходимо пространственно-временное изме-

рение классических наблюдаемых, а волновая функция используется для предсказания дальнейшего пространственно-временного протекания событий. Поэтому такую дополнительную, по мнению Вайцзеккера, естественно назвать "круговой".

Что же касается "параллельной" дополнительной, то она, согласно Вайцзеккеру, имеет место между понятиями одной и той же теории на одном и том же уровне, т.е. в смысле Паули.

Вайцзеккер признается, что Бор не согласился с предложенной им трактовкой, и указал, что дополнительность можно установить только между явлениями [76, S. 330].

Несогласие с трактовкой Бором дуализма, как частного случая дополнительной, высказал в своих поздних работах (начиная с 1949 г.) [77, p. 105; 78, с. 153] Макс Борн. По его мнению, "в физической и философской литературе часто злоупотребляли понятием "дополнительность", в чем до некоторой степени повинны не совсем точные формулировки Бора. Иногда отмечалось, что дополнительным является прежде всего описание процессов с помощью волн или частиц. Я считаю это абсолютно ошибочным, так как понятия "волна – частица" не находятся в отношении взаимного исключения и дополнения, а необходимы оба для полного описания квантовомеханической ситуации. В простейшем случае отдельных независимых частиц интенсивность волны (квадрат амплитуды) представляет собой вероятность появления частиц" [51, с. 430].

Если к сказанному добавить эволюцию способа выражения взглядов у самого Н. Бора, то, на первый взгляд, естественно ожидать серьезных упреков в адрес "копенгагенской интерпретации" за разноречивой и расплывчатостью формулировок. Однако часто утверждают, что именно "благодаря этой расплывчатости и связанной с ней гибкости понятий копенгагенская интерпретация сумела справиться с серьезными кризисами" [10, p. 356]. Согласно Фейерабенду, одна из причин "живучести веры в дополнительную перед лицом решительных возражений заключается в *расплывчатости* основных принципов этого кредо" [72, p. 193], а Вайцзеккер и Греневольт утверждали, что сама плодотворность

копенгагенской интерпретации в значительной степени обусловлена теми неопределенными формулировками, в которых эта концепция была выражена и в духе которых шло ее обсуждение [72, p. 256].

Бор и его ближайшие соратники думали подобным образом. "Выражение "копенгагенский дух"... не имеет ничего общего с догматической приверженностью к жестким доктринам. Наоборот, копенгагенский дух (*par excellence*) – это прежде всего полная свобода мнений и дискуссий. "Каждая высказываемая мною мысль, – часто повторяет Бор, – должна пониматься не как утверждение, а как вопрос", – писал Л. Розенфельд [2, с. 6]. Г. Крамерс указывал, что "в мире человеческого мышления вообще и в физике в частности наиболее плодотворными понятиями являются те, которым невозможно придать точно определенный смысл" (цит. по: [79, p. 263]). Следует заметить, однако, что для аутентичной трактовки концепции дополненности прежде всего важно понимание взглядов ее творца – Нильса Бора. Можно полностью согласиться со словами Фейерабенда, что "*первым шагом* в наших попытках достигнуть прогресса в микрофизике должно быть *возвращение к Бору*" [80, p. 104].

Дополненность и логика. В начале 30-х годов ряд физиков, математиков и логиков высказались в пользу возможности (а некоторые – даже за необходимость) для квантовой механики создания логики, отличной от классической. Были предложены и конкретные проекты такой логики (обзор основных направлений квантовой логики можно найти в работе: [81, с. 69-105]).

Поиски новой логики для квантовой механики, соответствующей принципу дополненности, шли в двух направлениях – синтаксическом и семантическом [82, с. 17]. Исторически первым начало развиваться синтаксическое направление, начало которому было положено известной работой Г.Д. Биркгофа и Й. фон Неймана [83, p. 823]. Его представители строят свои логические системы на основе математических теорий, в которых модели физических объектов выражены специальным, чисто математическим языком. Дополненность физических величин символизируется в этом языке некоммутативностью операторов, а последняя, в свою очередь, отображается в логической схеме не-

дистрибутивностью структуры. Таким образом, построение логики квантовой механики синтаксического направления сводится к переводу выражений языка математической квантовой теории на язык логики [82, с. 17]. Типичным примером реализации идей Биркгофа и фон Неймана является курс по квантовой механике, написанный Яухом [84], их критику можно найти у К. Поппера [85, р. 682-685].

Семантическое направление с самого начала ориентируется на концепцию дополнительности, пытаясь дать ее логическую экспликацию, минуя математический аппарат квантовой механики. П. Детуш-Феврие объясняет потребность в новой, трехзначной логике, которую она называет "логикой дополнительности", необходимостью адекватного отображения неклассических свойств микрообъектов [86, р. 384-385]. Г. Рейхенбах связывает необходимость в трехзначной логике с построением такой интерпретации квантовой теории, которая бы исключала утверждения о возможности одновременного измерения дополнительных величин, оставляя в то же время осмысленными утверждения об их одновременной реальности. Это достигается приписыванием третьего значения истинности ("неопределенно") высказыванию, скажем, о величине импульса в том случае, когда высказыванием о некоторой величине координаты имеет значение "истинно" [87, S. 30].

Позиции П. Детуш-Феврие и Г. Рейхенбаха олицетворяют два способа обоснования перехода к трехзначной логике при логическом отображении дополнительного способа мышления [88, с. 128-129]. Первый способ видит основание для ее использования в онтологических особенностях самого микромира и связан с трактовкой логики как специфической теории бытия, отражающей некоторые общие его свойства. Обычная двузначная (классическая) логика, по мнению сторонников объектно-онтологического обоснования логики, истинна для макромира, для микромира же вместо нее имеет силу особая трехзначная логика – логика дополнительности. Типичным примером такого рода рассуждений может служить следующее: "Классическая логика казалась абсолютно строгой непротиворечивой схемой, независимой от эксперимента и противо-

стоящей ему как готовая форма, в которую можно уложить любые физические соотношения. Классическая логика играла по отношению к физике роль, аналогичную роли пространства в классической картине мира. Квантово-релятивистская логика, в своем отношении к физике, позволяет продолжить эту аналогию, она меняет структуру в зависимости от физического "заполнения", подобно пространству релятивистской физики" [89, с. 111].

Сторонники второго способа обосновывают обращение к трехзначной логике особенностями *языка* микрофизики, содержащего высказывания, не допускающие эмпирической проверки и поэтому не являющиеся ни истинными, ни ложными. Это выражается во введении третьего значения истинности ("неопределенно") и отказе благодаря этому от закона исключенного третьего.

Новая классическая логика, как считают некоторые авторы, не обязательно должна быть трехзначной. Так, уже известный нам К. Вайцеккер предложил вариант бесконечнозначной вероятностной логики дополненности [90, Н. 19, S. 521-529; Н. 20, S. 545-555], а П. Миттельштедт, также работая в плане "логики возможного" [91, с. 126], построил модальную квантовую логику [92, S. 135].

По вопросу о целесообразности разработки специальной "логики дополненности" среди логиков и философов существуют значительные разногласия. Одни, как, например, Г. Рейхенбах, считают, что адекватную интерпретацию квантовой механики можно получить только с помощью новой логики, которая "призвана стать окончательной формой квантовой физики" [93, р. 189]. Другие категорически утверждают, что "допущение особой логики микрофизики (микромира), отличной от логики макрофизики и других наук, есть чисто беллетристическое явление, подобное некоторым направлениям современной научной фантастики и паразитирующее на смешении логических знаков и относящихся к ним логических правил" [88, с. 135], считая безрезультатным все попытки обоснования квантовой логики [94, S. 413-425]. Третьи занимают промежуточную позицию, указывают, что логика дополненности становится необходимой только на уровне формализации, но может считаться лишь допус-

тимой, если ограничиваться уровнем символизации (предполагающим обращение к физическому содержанию), на котором может применяться и обычная классическая логика [95, с. 23].

Творцы копенгагенской интерпретации также по-разному оценивали использование неклассической логики для истолкования квантовой физики. Н. Бор относился к этому определенно отрицательно, считая, что "попытки прибегнуть к трехвалентной логике, предлагаемые иногда в качестве способа рассмотрения парадоксальных черт квантовой механики, представляются не слишком пригодными для ясного освещения ситуации, поскольку все четко определенные экспериментальные данные, даже если их невозможно анализировать с точки зрения классической физики, всегда должны быть выражены на привычном языке, использующем обычную логику" [1, с. 397-398].

М. Борн, обсуждая рейхенбаховский вариант трехзначной логики, полагал, что "он заходит при этом слишком далеко, ибо рассматриваемая проблема является проблемой не только логики или логистики. Здесь имеет существенное значение и здравый смысл. Ибо в математической теории, которая способна в совершенстве описывать фактические наблюдения, используется обычная двузначная логика... Трехзначная логика представляет собой... пример... игры в символы. Игра эта забавна, конечно, но сомневаюсь, чтобы физика от нее много выиграла" [78, с. 156]. Однако после знакомства с работами К. Вайцеккера мнение М. Борна изменилось – он стал считать, что "по крайней мере стоит продумать ситуацию с точки зрения многозначной логики" [51, с. 459].

В общем благожелательно к модификации классической логики относился и В. Гейзенберг. Обсуждая вайцеккерский вариант логики дополненности, он соглашается, что предложенная Вайцеккером логическая схема "образует основу точного языка, который можно употреблять для описания строения атома", хотя "применение такого языка все-таки ставит ряд трудных проблем", касающихся, в частности, вопросов о соотношении различных уровней нового языка и выводов относительно лежащей в основе его онтологии [17, с. 156].

Из сказанного выше можно заключить, что несмотря на продолжающееся возрастание количества логических работ, посвященных конкретному построению различных вариантов квантовой логики, проблема перехода от классической логики к квантовой, возникшая в связи с концепцией дополнительности, все еще остается дискуссионной [82; 96, р. 2-33].

Перспективы дополнительности. Несмотря на трудности, связанные с адекватным пониманием всех тонкостей концепции дополнительности, на разногласия по поводу интерпретации ее действительного содержания и на критику ее основных положений, можно вполне согласиться с утверждением Дж. Уилера: "Распространение концепции дополнительности медленно, но необратимо" [4, р. 375]. Как указывает М. Джеммер, после V Сольвеевского конгресса 1927 г. копенгагенская интерпретация, основанная на этой концепции, в течение двух с половиной десятилетий "была единственной общепринятой интерпретацией квантовой механики – а для большинства физиков она остается таковой и сегодня" [10, р. 361]. Развитие физики в области релятивистской квантовой механики и теории элементарных частиц также обнаруживает связь с методологией дополнительности [72, р. 191, 255; см. также: 97, с. 3-4]. Наконец, идея дополнительности продолжает распространяться и за пределами физики – в психологии, биологии, этике и даже теологии. С помощью дополнительности предлагали трактовать социальные и индивидуальные аспекты развития науки [98, р. 107-114], статистическую структуру и динамику развития экономических систем [5, с. 77-78], философские системы Канта и Кассирера [99, S. 40-48] и т.п.

Под влиянием всех этих успехов, естественно, сложилось убеждение, что "идея дополнительности... очевидно применима в любой области мышления... Никогда нельзя будет отказаться от обладания этим новым способом ясного мышления и речи" [4, р. 376; 100, р. 81-82].

Однако с 50-х годов начало довольно широко распространяться противоположное направление в отношении дальнейшего использования концепции дополнительности в качестве методологического принципа. Сторонники этого

направления указывают, что эмпирический успех не доказывает невозможности существования альтернатив дополнительного способа мышления, утверждая, в частности, что даже в области релятивистской квантовой механики "нет ни одного здравого аргумента ... в пользу того, что дополнительность представляет собой последнее слово" [72, p. 192].

Внутри этого течения, критические замечания которого в адрес конкретного содержания различных сторон концепции дополнительности были рассмотрены выше, можно выделить две "струи". Принадлежащие к первой из них – сторонники объектной трактовки физической реальности – считают, что принцип дополнительности не адекватен в качестве средства интерпретации квантовой механики и не сыграл никакой методологической роли в процессе ее формирования: "В квантовой механике ничего нельзя вывести из дополнительности" [101, p. 51]. Отрицая даже достижения концепции дополнительности, они, естественно, отказывают ему в каких бы то ни было перспективах.

Исследователи, олицетворяющие вторую "струю", соглашаясь с трактовкой концепции дополнительности Бора, отказывают ей в праве быть, во-первых, единственной основой интерпретации квантовой механики, а во-вторых, – единственной перспективой будущего развития физики. Они считают "по меньшей мере сомнительным, что практика работы всего сообщества физиков воплощает в жизнь философию дополнительности" [102, p. 3] и пытаются разрабатывать конкретные альтернативы дополнительному способу мышления, избегая, в частности, классического языка (см. в этой связи изложенные выше взгляды Д. Бома). С наибольшей полнотой взгляды этого направления были представлены на кембриджском симпозиуме 1968 г. [60].

Если понимать под квантовой механикой теорию, математический аппарат которой построен с помощью операторов и функций в гильбертовом пространстве, то ее ортодоксальная интерпретация, основанная на концепции дополнительности, представляется все же наиболее адекватной [103, с. 116]. Изменение интерпретации может быть осуществлено только путем модификации

математического аппарата квантовой механики, о чем свидетельствуют работы Д. Бома [70], Ф. Боппа [51, с. 461-463] и ряда других авторов [104, с. 287-292].

Что же касается перспектив концепции дополнительности, то вполне можно согласиться с М. Борном, справедливо полагающим, что "нет необходимости отказываться от того обогащения нашего мышления, которое предоставляют нам эти соображения" [51, с. 463]. Это отнюдь не означает превращения идеи дополнительности в догму и единственно возможный способ мышления. Об этом очень хорошо сказал Л. Розенфельд: "Подчеркивая универсальный аспект дополнительности, Бор больше, чем кто-либо, пронизательно осознавал опасность метафизической трактовки этой концепции. Он постоянно предупреждал нас, что в общем процессе развития физики дополнительность является лишь одним из этапов, который мы должны будем вскоре преодолеть."

Мы можем уже отчетливо видеть границы той области, в которой можно определять дополнительные явления в смысле соотношения неопределенностей. Проблемы, возникшие в связи с ядерными силами и различными элементарными частицами, требуют для своего разрешения новых методов, которые, весьма вероятно, принесут с собой качественное изменение в наших представлениях, сравнимое с тем, которое имело место при переходе от (лапласовского) детерминизма к дополнительности. Но подобно тому, как законы квантовой физики и ее дополнительные соотношения не могут быть сформулированы без существенного использования детерминистских законов классической физики, дополнительность обязательно останется основой будущих новых представлений, которые выйдут за ее пределы. Обобщив детерминизм, дополнительность не разрушила его, она, скорее, укрепила его и сделала более плодотворным, указав пределы его применимости. Точно так же будущая теория укрепит значение дополнительности, указав ее место в рамках какого-то более широкого синтеза [30, р. 408-409].

Принцип дополнительности в трудах Н. Бора получил распространение на другие области знания. Замечание о далеко идущей аналогии между ситуацией в атомной физике и общими трудностями образования человеческих понятий, которым завершилась первая статья Бора о дополнительности "Квантовый постулат и новейшее развитие атомной теории", получило разработку в последующих статьях и выступлениях Бора. Бор никогда не упускал случая подчеркнуть, что в атомной физике "мы получили урок и по линии теории познания, причем урок этот касается и тех проблем, которые лежат далеко за пределами физики" [1, с. 482]. Позволяя "подметить в разных областях общие черты и тем самым содействовать стремлению к единству знания" [1, с. 488], этот урок "естественно заставляет нас заново пересмотреть и в других областях знаний применение наших способов общения для объективного описания. Упор, который делается на проблему наблюдения в атомной физике, не в меньшей мере подымает аналогичные вопросы в биологии..." [1, с. 512].

Первое замечания в отношении применения концепции дополнительности к биологии было довольно беглым и относилось скорее к соотношению между физиологическими и психологическими процессами в связи с проблемой психофизического параллелизма, чем к собственно биологии [1, с. 60-61, 118-119]. Поставив вопрос о том, что может дать новейшее развитие наших знаний об атомных процессах для проблемы живого организма, отметив важное значение квантовых представлений для понимания отдельных процессов в живом организме, Бор ограничился лишь общим указанием на подход "к границам возможности однозначного описания с помощью наших обычных наглядных представлений" [1, с. 70]. Лишь в 1932 г., в докладе "Свет и жизнь" мы впервые находим развернутое изложение взглядов Бора на дополнительность собственно биологического и физико-химического подходов к изучению явлений жизни.

Подробно осветив важную роль квантовых физико-химических процессов в функционировании живых существ, Н. Бор заявляет, что "признание важного значения черт атомистичности в механизме живых организмов само по себе не является ...достаточным для всестороннего объяснения биологических

явлений" [1, с. 116]. Вопрос дальнейшего обсуждения ставится так: "Не следует ли добавить к нашему анализу явлений природы еще какие-то недостающие пока фундаментальные идеи, прежде чем мы сможем достигнуть понимания жизни на основе физического опыта" [1, с. 116]? Не соглашаясь с позицией витализма, предполагающего существование особой, не подвластной ведению физики жизненной силы, управляющей органической жизнью, Бор, как и большинство физиков, был убежден, что даже "если бы мы могли продвинуть анализ механизма живых организмов столь же далеко, как это сделано для атомных явлений, то мы едва ли бы нашли тогда какие-то свойства, чуждые неорганической материи" [1, с. 116-117].

Недостаточность физико-химических закономерностей для объяснения жизненных явлений, несводимость биологии к физике и химии, таким образом, согласно Бору, обусловлена методологическими соображениями: "Мы должны... помнить, что нельзя непосредственно сравнивать условия при биологических и при физических исследованиях, так как необходимость сохранить объект исследования живым налагает на первые ограничение, не имеющее себе подобного в последних. Так, мы, без сомнения, убили бы животное, если бы попытались довести исследование его органов до того, чтобы можно было сказать, какую роль играют в его жизненных проявлениях отдельные атомы... С этой точки зрения самое существование жизни должно в биологии рассматриваться как элементарный факт, подобно тому как в атомной физике существование кванта действия следует принимать за основной факт, который нельзя вывести из обычной механической физики. Действительно, существенная несводимость факта устойчивости атомов к понятиям механики представляет собой близкую аналогию с невозможностью физического или химического объяснения своеобразных отправлениях, характеризующих жизнь" [1, с. 117].

Фундаментальное различие между физическими и биологическими исследованиями, по мысли Бора, "означает, что нельзя поставить четко определенный предел применимости физических идей к проблемам жизни – предел, которому соответствовала бы в атомной механике разница между областью

причинного механистического описания и собственно квантовыми явлениями... Сущность рассматриваемой аналогии – это очевидное антагонистическое отношение между такими типичными сторонами жизни, как самосохранение и размножение индивидуумов, с одной стороны, и необходимое для всякого физического анализа подразделение объекта, с другой. Благодаря этой важной черте дополнительности, понятие цели, чуждое механистическому анализу, находит некоторое приложение к биологии. В самом деле, в этом смысле телеологическую аргументацию можно рассматривать как законную черту физиологического описания, должным образом учитывающую характерные свойства жизни" [1, с. 118].

Только что приведенные мысли были повторены Н. Бором в 1937 г. в статье "Причинность и дополнительность", где он специально подчеркнул, что принцип дополнительности, с одной стороны, отвергает всякий компромисс с каким-либо антирационалистическим витализмом, а с другой – с равным успехом может служить для разоблачения определенных предрассудков механицизма [1, с. 211].

Убежденность в том, что "собственно биологические закономерности представляют законы природы, дополнительные к тем, которые пригодны для объяснения свойств неодушевленных тел" [1, с. 257], сохранилась у Бора до конца его жизни. Он высказал его в своей речи "Единство знаний" (1955 г.), снова подчеркнув дополнительность детерминистического (механистического) и телеологического подходов к пониманию жизненных явлений [1, с. 490], и в 1957 г., уже после открытия молекулярных основ наследственности, значительно расширившего область применения физико-химических идей к биологическим проблемам [1, с. 524]. Единственным уточнением, которое считал нужным сделать Бор, было указание на специфику основания для применения "дополнительного" способа мышления в биологии по сравнению с атомной физикой. Если в последней дополнительность является следствием требования четко отличать измерительные приборы от исследуемых объектов в индивидуальных актах наблюдения, то в биологии "дополнительный" подход нужен по другой

причине – "его требуют те практически неисчерпаемые скрытые возможности живых организмов, которые обуславливаются их чрезвычайно сложным строением и функциями" [1, с. 535]. Именно неисчерпаемая сложность живого делает необходимым применять понятия, относящиеся к поведению организма как целого, в том числе и понятие жизни. Таким образом биологическая дополнительность детерминизма ("механизма") и телеологизма по сути дела представляет собой дополнительность описания живого на уровне целого (организма) и на уровне элементов (физико-химических процессов).

Имея в виду способы расширения области применимости концепции дополнительности, можно конкретизировать мысль Бора об общих чертах, которые можно подметить в разных областях знания с помощью этой концепции. Это черты целостности, индивидуальности, присущие как атомным процессам и актам наблюдения, так и живым организмам. Их отображение с помощью обычного человеческого языка – этого единственного средства коммуникации между индивидами – требует дополнительного способа описания, необходимость в котором возникает вследствие обязательности учета "тех обстоятельств, которые делают однозначным применение наших первичных понятий" [1, с. 532].

Таким образом, последним основанием возможности распространения принципа дополнительности на другие области знания, по мысли Бора, является неизбежность описания результатов человеческой деятельности в любой области – будь то биология или другие науки и другие сферы знания – средствами обычного языка. Это исходный и главный пункт подхода Бора к обоснованию концепции дополнительности в контексте более широкой проблемы единства человеческого знания (см.: [105, с. 12]).

Литература

1. Бор Н. Избранные научные труды. Т. П. М., 1971.

2. Розенфельд Л. Нильс Бор // Вопросы истории естествознания и техники. Вып. 17. М., 1964.
3. Розенфельд Л. Развитие принципа дополнительности // Нильс Бор. Жизнь и творчество. М., 1967.
4. Wheeler J.A. A Septet of Sybils: Aid in Search for Truth // "American Scientist". 1956. Vol. 44.
5. Кузнецов Б.Г. Принцип дополнительности. М., 1968.
6. Problems in the Philosophy of Science. Amsterdam, 1968.
7. Хютт В. Методологическое значение принципа дополнительности // "Известия АН Эстонской ССР". Серия физико-математических и технических наук. 1965. № 4. С. 499; Принцип дополнительности и материалистическая диалектика. Обнинск. 1972.
8. Klein M.J. The First Phase of the Bohr-Einstein Dialogue // Historical Studies in the Physical Sciences. Vol. II. Philadelphia, 1970.
9. Бор Н. Избранные научные труды. Т. 1. М., 1970.
10. Jammer M. The Conceptual Development of Quantum Mechanics. N.Y., 1966.
11. Holton G. The Roots of Complementarity // Daedalus. 1970. Vol. 99. N 4.
12. Гейзенберг В. Развитие интерпретации квантовой теории // Нильс Бор и развитие физики. М., 1958.
13. Slater J. Radiation and atoms // "Nature". 1924. Vol. 113.
14. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. III. М., 1966.
15. Lande A. Neue Wege der Quantentheorie // "Die Naturwissenschaften". 1926. Bd. 14.
16. Waerden B.L. van der. Sources of Quantum Mechanics. N.Y., 1968.
17. Гейзенберг В. Физика и философия. М., 1963.
18. Нильс Бор. Жизнь и творчество. М., 1967.
19. Bohr N. On the Quantum Theory of Line Spectra // Sources of Quantum Mechanics. N.Y., 1968.
20. Петров А.З. Физическое пространство-время и теория физических измерений // Пространство и время в современной физике. Киев, 1968.

21. Фок В.А. Критика взглядов Бора на квантовую механику // Философские вопросы современной физики. М., 1958.
22. Омеляновский М.Э. Философские вопросы квантовой механики. М., 1956.
23. Шифф Л. Квантовая механика. М., 1959. С. 19.
24. Гейзенберг В. Квантовая теория и ее интерпретация // Нильс Бор. Жизнь и творчество. М., 1967.
25. Гейзенберг В. Воспоминания об эпохе развития квантовой механики // Теоретическая физика XX века. М., 1962.
26. Френкель Я.И. На заре новой физики. Л., 1970.
- 27.** Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. IV. М., 1967.
28. Бройль Л. де. Останется ли квантовая физика индетерминистической? // Вопросы причинности в квантовой механике. М., 1955.
29. Bohm D., Schumacher D.L. On the failure of communication between Bohr and Einstein. Я благодарен проф. Бому за любезное предоставление оттиска этой неопубликованной типографским способом работы.
30. Rosenfeld L. Strife about Complementarity // Science Progress. 1953. Vol. 41. № 163.
31. Бунге М. Причинность. М., 1962.
32. Rosenfeld L. Foundations of Quantum Theory and Complementarity // "Nature", 1961. Vol. 190. N 4774.
33. Rosenfeld L. Misunderstanding about the Foundations of Quantum Theory // Observation and Interpretation/ London, 1957.
34. Rosenfeld L. Complementarity // "ICSU Review", 1962. Vol. 4. N 1.
35. Bunge M. Physics and Reality // "Dialectica", 1965. Vol. 19. N 3-4.
36. Bunge M. The Turn of the Tide // Quantum Theory and Reality. Berlin, 1967.
37. Марков М.А. О природе физического знания // "Вопросы философии", 1947. № 2.
38. Фок В.А. Об интерпретации квантовой механики // Философские вопросы современной физики. М., 1959.
39. Фок В.А. Квантовая физика и строение материи. Л., 1965.

40. Познер А.Р. Дополнительности принцип // *Философская энциклопедия*. Т. II. М., 1962.
41. Алексеев И.С. О копенгагенской интерпретации квантовой механики // *Строительство коммунизма и философские науки*. Новосибирск, 1963.
42. Алексеев И.С. Некоторые теоретико-познавательные проблемы дополнительности // *Философские проблемы сознания и познания*. Новосибирск, 1965.
43. Омельяновский М.Э. В.И. Ленин и физика XX в. М., 1947; он же. Философские вопросы квантовой механики. М., 1956; он же. Диалектика в современной физике. М., 1973.
44. Jordan P. *Anshauliche Quantentheorie*. Berlin, 1936.
45. Jordan P. *Die Physik des 20. Jahrhunderts*. Braunschweig, 1936.
46. Jeans J. *Physics and Philosophy*. Cambridge, 1943.
47. Бройль Л. де. *Введение в волновую механику*. М., 1934.
48. Broglie L. de. *The Current Interpretation of Wave Mechanics*. Amsterdam, 1964.
49. Шредингер Э. *Новые пути в физике*. М., 1971.
50. Schrödinger E. Are the Quantum Jumps? // *British Journal for the Philosophy of Science*. 1952. Vol. 3.
51. Борн М. *Физика в жизни моего поколения*. М., 1963.
52. Lande A. *From Dualism to Unity in Quantum Physics*. Cambridge, 1960.
53. Lande A. *New Foundations of Quantum Mechanics*. Cambridge, 1965.
54. Lande A. *Foundations of Quantum Theory*. New Haven, 1955.
55. *Dialogue on Dualism // Physics Today*. 1968. Vol. 21. N 8.
56. Розенфельд Л. *Основания квантовой теории и дополнительность // Новые проблемы физики*. М., 1965.
57. Bunge M. *Foundations of Physics*. N.Y., 1967.
58. Фок В.А. Замечания к статье Бора о его дискуссиях с Эйнштейном // *Успехи физических наук*. 1958. Т. 66. Вып. 4.
59. Фок В.А. *Квантовая физика и философские проблемы // Ленин и современное естествознание*. М., 1969.

60. Quantum Theory and Beyond. Cambridge, 1971.
61. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская теория). М., 1963.
62. Weizsäcker C.F. The Copenhagen Interpretation // Quantum Theory and Beyond. Cambridge, 1971.
63. New Directions Within Quantum Theory: What does the Quantum Theoretical Formalism Reality Tell us? // Quantum Theory and Beyond. Cambridge, 1971.
64. Bastin T. How does a Particle Get from A to B? // Quantum Theory and Beyond. Cambridge, 1971.
65. Вопросы причинности в квантовой механике. М., 1955.
66. Бом Д. Квантовая теория. М., 1961.
67. Bohm D. On Bohr's Views Concerning the Quantum Theory // Quantum Theory and Beyond.
68. Bohm D., Bub J. A Proposed Solution of the Measurement Problem in Quantum Mechanics by a Hidden Variable Theory // Review of Modern Physics. 1966. Vol. 38.
69. Bohm D. On the Role of Hidden Variables in the Fundamental Structure of Physics // Quantum Theory and Beyond.
70. Bohn D., Hill B.I. On a New Mode of Description in Physics // International Journal of Theoretical Physics. 1970. Vol. 3. N 3.
71. Ракитов А.И. Анатомия научного знания. М., 1969.
72. Feyerabend P.K. Problems of Microphysics // Frontiers of Science and Philosophy. Pittsburgh, 1962. Notes 11, 12, 18.
73. Поликарпов А. Относительность и кванты. М., 1966.
74. Паули В. Общие принципы волновой механики. М.-Л., 1947.
75. Broglie L. de. Physics and Microphysics. London, 1955.
76. Weizsäcker C.F. von. Zum Weltbild der Physik. Stuttgart, 1960.
77. Born M. Natural Philosophy of Cause and Chance. Oxford, 1949.
78. Борн М. Моя жизнь и взгляды. М., 1973.
79. Historical Studies in the Physical Sciences. Vol. II. Philadelphia, 1970.

80. Feyerabend P.K. On a Recent Critique of Complementarity // Philosophy of Science. 1969. Vol. 36. N 1.
81. Обзор основных направлений квантовой логики можно найти в работе: Кузнецов Б.Г. Пути квантово-релятивистской логики // Труды Института истории естествознания и техники АН СССР. М., 1959. Т. 22.
82. Пятницын Б.Н., Меськов В.С. Некоторые вопросы логического анализа дополнителности // Принцип дополнителности и материалистическая диалектика. Обнинск, 1972.
83. Birkhoff G., Neumann J. von. The Logic of Quantum Mechanics // Annals of Mathematics. 1926. Vol. 37. N 4.
84. Jauch J.M. Foundations of Quantum Mechanics. London, 1968.
85. Popper K.R. Birkhoff and von Neumann's Interpretation of Quantum Mechanics // Nature. 1968. Vol. 219. N 5155.
86. Destouch-Fevrier P. Manifestations et sens de la notion de Complementarité // Dialectica. 1948. Vol. 2. N 3-4.
87. Reichenbach H. Philosophical Foundations of Quantum Mechanics. Los-Angeles. 1946.
88. Зиновьев А.А. О логике микрофизики // Вопросы философии. 1970. № 2.
89. Кузнецов Б.Г. Об основах квантово-релятивистской логики // Логические исследования. М., 1959.
90. Weizsäcker C.F. von. Komplementarität und Logik // Die Naturwissenschaften. 1955. Bd. 42.
91. Стаханов И.П. Логика "возможного" // Вопросы философии. 1970. № 2.
92. Mittelstaedt P. Quantenlogik // Fortschritte der Physik. 1961. Bd. 9. N 2-3.
93. Reichenbach H. The Rise of Scientific Philosophy. Berkeley, 1954.
94. Lenk H. Philosophische Kritik und Begründungen von Quantenlogik // Philosophia Naturalis. 1969. Vol. 11. N 4.
95. Принцип дополнителности и материалистическая диалектика. Обнинск, 1972.

96. Heelan P. Quantum and Classic Logic: their Respective Roles // *Synthese*, 1970. Vol. 21. N 2.
97. Тамм И.Е. Памяти Нильса Бора // *Вестник Института истории естествознания и техники*. Вып. 17. М., 1964.
98. Rosenfeld L. Social and Individual Aspects of the Development of Science // *Проблемы теоретической физики*. М., 1972.
99. Sundaram K. Kant or Cassirer: A Study on Complementarity // *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*. 1972. Bd. III. H. 1.
100. Oppenheimer J. R. *Science and the Common Understanding*. N.Y., 1953.
101. Taketani M. On Research Contributions of Niels Bohr // *Supplement of the Progress of Theoretical Physics*. 1971. N 50.
102. Bastin T. Editorial // *Quantum Theory and Beyond*.
103. Алексеев И.С. Развитие представлений о структуре атома. Новосибирск, 1968.
104. Алексеев И.С. Об одной интерпретации квантовой механики // *Логика и методология науки*. М., 1967.
105. См.: Бор Н. Единство человеческого знания // *Техника – молодежи*. 1961. № 8.