

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

КРИТИКА ВЗГЛЯДОВ БОРА НА КВАНТОВУЮ МЕХАНИКУ

В. А. Фок

В 1948 г. на страницах издаваемого в Швейцарии журнала «Диалектика» состоялась дискуссия по принципиальным вопросам квантовой механики. В этой дискуссии приняли участие многие выдающиеся зарубежные физики: Бор, Гейзенберг, Эйнштейн, Паули и другие, статьи которых были напечатаны в № 7,8 упомянутого журнала за 1948 г. Руководящей является статья Бора «О понятиях причинности и дополнительности». Эту статью можно рассматривать не только как выражение взглядов собственно копенгагенской школы, но и как выражение тех взглядов на квантовую механику, которые господствуют среди зарубежных физиков.

Взгляды эти вырабатывались на основе идеалистической философии — так называемого позитивизма, несовместимой с марксистско-ленинской философией диалектического материализма. Неправильные философские установки, применённые к какой-либо конкретной области науки, почти неизбежно приводят к ошибкам в самой этой области. Поэтому особенно важно проанализировать, нет ли во взглядах представителей копенгагенской школы на квантовую механику помимо неприемлемых общеполитических высказываний, неправильность которых для советского читателя очевидна, также и конкретных ошибок, приводящих к неправильному толкованию самой квантовой механики. Поскольку упомянутая статья Бора представляет резюме этих взглядов, сформулированное признанным главой копенгагенской школы, она даёт удобный материал для такого анализа.

Чтобы быть точными, нам придётся подробно изложить содержание упомянутой статьи Бора и привести из неё достаточно полные цитаты.

Во вводной части своей статьи Бор говорит о причинном способе описания явлений в классической физике, и пишет: «теория относительности, которая придала классической физике небывалое единство и широту, позволила точно формулировать принцип причинности в самом общем виде».

По этому поводу можно заметить следующее. Несомненно, что в области физики теория относительности значительно уточнила понятие причинности. Точная же формулировка принципа причинности в самом общем виде есть вопрос общеприродный и решение этого вопроса принадлежит классикам марксизма.

Дальше Бор пишет следующее:

«Совершенно новое положение вещей в физической науке создалось, однако, благодаря открытию универсального кванта действия. Это открытие обнаружило первичную черту неделимости атомных процессов, идущей гораздо дальше старого учения об ограниченной делимости материи, которое было первоначально введено для причинного объяснения свойств вещества и служило основанием этому объяснению. Эта новая черта не только совершенно чужда классическим теориям механики и электромагнетизма, но даже несовместна с самой идеей причинности».

Таким образом, Бор утверждает, что существование кванта действия несовместно с самой идеей причинности. Чем он это мотивирует? Продолжаем цитату.

«В самом деле, если задано состояние физической системы, то этим, очевидно, ещё не определяется, какой именно из различных элементарных процессов перехода в другие состояния будет иметь место. При учёте квантовых эффектов приходится существенным образом оперировать с понятием вероятности различных возможных процессов перехода».

Сказанное здесь верно, но никак не может служить доводом в пользу несоблюдения принципа причинности. Прежде всего, причинность не сводится к однозначной детерминированности, а включает более общее понятие о закономерности. Кроме того, в квантовых явлениях необходимо различать между развитием во времени состояния системы, находящейся в строго определённых физических условиях, и тем скачкообразным изменением состояния, которое приходится вводить при резком и не поддающемся точному контролю изменении физических условий. (Такое резкое изменение физических условий бывает необходимо для измерения той или иной физической величины). Совершенно естественно, что в квантовой механике волновое уравнение, описывающее с той или иной степенью точности состояние системы, находящейся в определённых физических условиях, перестаёт быть применимым, когда эти условия резко меняются и становятся не вполне определёнными. Когда физические условия заданы, изменение состояния происходит по определённому закону, в полном соответствии с принципом причинности. Когда же эти условия резко и неопределённым образом меняются, никак нельзя требовать, чтобы изменение состояния было предопределено наперёд. Но и это изменение состояния отнюдь не является бессистемным, а подчиняется определённым вероятностным законам, что также соответствует принципу при-

Т.о. причинность
как средство резко
неопред. измен.
..скачкообраз. ч.случайн.

чинности. Состояние объекта в момент времени, непосредственно предшествующий внешнему вмешательству, определяет собой вероятность того или иного поведения объекта при этом вмешательстве. Можно даже сказать, что и само состояние характеризуется вероятностью того или иного поведения объекта при всевозможных потенциальных внешних воздействиях. К этому вопросу мы вернёмся в дальнейшем.

Далее Бор указывает на наличие корпускулярных и волновых свойств частиц и говорит, что «всякое определение постоянной Планка основано на сопоставлении двух аспектов явления, которым соответствуют картины, не совместимые в рамках классических теорий». Последнее замечание представляется нам довольно тривиальным, так как из опытов, в которых не проявляются квантовые эффекты, конечно, нельзя определить постоянной Планка. Бор, однако, после этого говорит:

«При таком положении вещей мы встречаемся с необходимостью радикального пересмотра самых основ для описания и объяснения физических явлений», предпосылая эти слова изложению основных идей квантовой механики в его понимании.

Переходя к изложению квантовой механики, Бор прежде всего подчёркивает, «что описание экспериментальной установки и регистрация наблюдений всегда должны быть выражены на обычном языке, пользуясь терминологией классической физики». Само по себе это утверждение бесспорно верно. Однако из него отнюдь нельзя делать таких выводов, какие делает Бор, а именно, что всё остальное, кроме описания экспериментальной установки и регистрации наблюдений, имеет лишь символический характер. К этой точке зрения Бора мы вернёмся ниже.

Затем Бор говорит:

«Тот факт, что квантовые явления не могут быть анализированы в духе классической физики, влечёт за собой невозможность разделить поведение атомных объектов от их взаимодействия с измерительными приборами, которые фиксируют условия, в каких происходят явления.

В частности, неделимость типичных квантовых эффектов выражается в том, что всякая попытка подразделить явление требует изменения экспериментальной установки, каковое изменение вносит новые источники неконтролируемого взаимодействия между объектами и измерительными приборами».

В первой фразе правильно указывается на то, что состояние атомных объектов и их «поведение», т. е. изменение состояния, зависят от внешних условий, и что поэтому существенно необходимо эти внешние условия фиксировать. Мысль, высказанная во второй фразе, также в общем правильна, хотя слова о неконтролируемом взаимодействии, строго говоря, лишены точного смысла. В самом деле, здесь речь идёт о взаимодействии в самом акте изме-

рения. Но что значит «контролировать»? По существу, это значит «измерять». Таким образом, «неконтролируемость» означает, по нашему мнению, просто невозможность вставить добавочное измерение, не нарушая условий данного измерения. Повидимому, слова Бора о неконтролируемом взаимодействии представляют попытку пояснить на языке классической физики то положение вещей, которое возникает из соотношений Гейзенберга, применённых к взаимодействию между объектом и прибором. Что бы ни понимал под этими словами Бор, с нашей точки зрения они во всяком случае никакого более глубокого смысла не имеют и тем более не должны пониматься в смысле какого-либо утверждения о непознаваемости процесса взаимодействия и т. п.

Утверждение Бора о невозможности разделить поведение атомных объектов от их взаимодействия с измерительными приборами также можно принять лишь с оговорками. Как видно из дальнейшего, Бор понимает это утверждение не в смысле взаимосвязи между изучаемым объектом и окружающим его полем и внешними предметами, в частности измерительными приборами, а в том смысле, что атомный объект как бы растворяется в измерительном приборе и становится менее реальным, чем измерительный прибор.

Кроме того, Бор не указывает, что именно он понимает под измерительным прибором: считает ли он, что измерительный прибор включает ту часть, где объект находится в фиксированных внешних условиях и явление развивается без помех, или же он понимает под прибором то устройство, которое вводится в действие лишь в последней стадии опыта и служит для регистрации результата измерения.

Например, в явлении дифракции электронов мы имеем фиксированные внешние условия внутри кристаллической решётки, сквозь которую проходит электрон (регулярное расположение атомов, упругий характер столкновений электронов с ними). Для наблюдения дифракционной картины мы можем поставить позади кристалла фотографическую пластинку, ряд счётчиков или какой-нибудь иной прибор, способный измерять координату электрона. Детали его устройства безразличны; в случае фотопластинки или счётчика мы имеем дело с усилительным устройством, в котором развиваются процессы лавинного характера. Наличие же кристалла для явления дифракции существенно: если кристалла нет, то и дифракции не будет, а если он есть, то дифракция будет, независимо от того, как будет регистрироваться дифракционная картина и будет ли она вообще регистрироваться. Для краткости мы будем называть ту часть прибора, где происходит само явление, рабочей частью прибора, а ту часть, где оно регистрируется, — регистрирующей частью. В нашем примере рабочей частью является кристалл, а регистрирующей — фотопластинка или счёт-

чик. Кроме рабочей и регистрирующей частей можно говорить о приготовляющей части: это — та часть, которая фиксирует состояние объекта перед его попаданием в рабочую часть. В нашем примере приготовляющей частью является источник монохроматического лучка электронов, а также диафрагмы и другие устройства, поставленные перед кристаллом. Необходимо отметить, что, поскольку явление может происходить и в естественных условиях, приготовляющая, а также рабочая часть могут осуществляться сами собою и лишь регистрирующая часть требует, вообще говоря, особого устройства.

Упомянутая выше неточность Бора заключается в том, что он не проводит разграничения между различными частями измерительного прибора и оставляет открытым, понимает ли он под измерительным прибором только его регистрирующую часть или же он включает в это понятие также и рабочую часть. Слова о «неконтролируемом взаимодействии» относятся, очевидно, к регистрирующей части, тогда как утверждение, что измерительные приборы фиксируют условия, в каких происходят явления, повидимому, может относиться только к рабочей части.

В результате этой неточности (возможно умышленной) затуманено существенно важное различие между поведением объекта в фиксированных внешних условиях и его поведением в условиях, не вполне определённых. Поведение объекта в фиксированных внешних условиях вполне определяется начальным состоянием и свойствами самого объекта и может быть весьма точно описано на языке квантовой механики. Результат же последнего этапа измерения, связанного с взаимодействием объекта с регистрирующей частью измерительного прибора, должен уже описываться на языке классической физики, причём вероятность того или иного результата вычисляется по формулам квантовой механики.

Из сказанного им Бор делает следующий вывод:

«При таком положении вещей приписывание атомным объектам обычных, условно принятых, физических атрибутов (conventional physical attributes) связано с неоднозначностью».

Несколько туманная фраза об условных физических атрибутах требует расшифровки. Если здесь разумеется невозможность приписывать, например, электрону при всех условиях определённую координату или определённое количество движения, то с этим можно согласиться, поскольку, согласно квантовой механике, какие бы то ни было классические модели атомных объектов имеют лишь ограниченную применимость*). Но фраза составлена в такой общей форме, что под физическими атрибутами могут разумеаться

*) Толкование соотношений неопределённости Гейзенберга как принципа ограниченной применимости классических моделей дано в нашей работе (Вестник Ленинградского университета, № 4, стр. 31, 1949).

и такие свойства электрона, как заряд, масса, спин, свойства, связанные с видом оператора энергии и определяющие взаимодействие электрона с другими частицами и с внешними полями. Все эти свойства совершенно объективны и несомненны, и ни о какой их условности не может быть и речи. Поэтому, если Бор имел здесь в виду оспаривать наличие у атомных объектов объективных свойств, подобных перечисленным, то в этом с ним никак согласиться нельзя.

Дальше Бор вводит свой термин «дополнительность» (сперва в применении к наблюдениям, произведённым при различных экспериментальных установках) и переходит к характеристике квантовой механики. Чрезвычайно любопытна та роль, которую отводит Бор квантовой механике в описании и объяснении атомных явлений. Вместо того, чтобы прямо признать, что предметом и назначением квантовой механики является более глубокое изучение свойств атомных объектов, Бор с самого начала говорит: «Надлежащим средством для дополнительного способа описания является аппарат квантовой механики». Тем самым роль квантовой механики заранее сводится к составлению формальных рецептов для вычисления вероятностей различных результатов наблюдений, без всякого проникновения в сущность явления. Характеризуя аппарат квантовой механики, Бор всячески подчёркивает его будто бы исключительно символический характер. Бор говорит, что в этом аппарате «сохраняются канонические уравнения классической механики, но физические переменные заменяются символическими операторами, подчинёнными некоммутативной алгебре». Непонятно, почему математический аппарат квантовой механики более символичен, чем аппарат любой другой физической теории. Математика всегда оперирует с символами, но поскольку в физической теории эти символы допускают определённое физическое толкование, они перестают быть абстрактными символами, а отражают действительность. Так обстоит дело независимо от сложности применяемого математического аппарата. Уравнение Шредингера квантовой механики не более и не менее символично, чем уравнение Гамильтона — Якоби классической механики. Бор же подчёркивает, что классическая механика имеет дело с физическими переменными, тогда как квантовая механика — будто бы лишь с символическими операторами. Трудно удержаться от мысли, что такое противопоставление нужно Бору для того, чтобы оставить за собою право подвергнуть сомнению реальность существования и свойств атомных объектов, с которыми оперирует квантовая механика. Стремление устранить прямое физическое толкование аппарата квантовой механики, оставив за ним только символический смысл, доводит Бора до абсурда. Так, он говорит: «Самые же эти символы не допускают наглядной интерпретации, на что указывает уже употребление мнимых чисел». Как будто бы мнимые чи-

сла заключают в себе что-то мистическое и употребление и исключает возможность наглядной интерпретации! Ведь с ним постоянно оперирует и классическая физика, особенно электро техника.

Свою мысль о том, что математический аппарат квантовой механики будто бы не связан непосредственно со свойствами атомных объектов (о реальности которых Бор вообще нигде не упоминает), а играет чисто вспомогательную роль для координации результатов измерений, Бор выражает и прямо. Он пишет:

«Весь аппарат следует рассматривать как средство для вывода предсказаний, однозначного или статистического характера, относящихся к результатам, которые могут быть получены при определённых экспериментальных условиях».

Эта мысль, что не просто знание объективных свойств реальных атомных объектов, а нечто чисто символическое является основой для предсказаний, несомненно внушена Бору его идеалистической философской установкой. Бор не является вполне последовательным идеалистом, поскольку он, повидимому, всё же признаёт реальность тех явлений, которые могут быть описаны на языке классической физики, но его точка зрения на квантовую механику является бесспорно идеалистической.

Переходя затем к рассмотрению соотношений Гейзенберга, Бор указывает на «взаимно исключающие условия, при которых можно без противоречий пользоваться локализацией в пространстве и времени, с одной стороны, и законами сохранения механики, с другой». «В самом деле, — говорит Бор, — всякая попытка локализации атомного объекта в пространстве и времени требует такого экспериментального устройства, в котором происходит принципиально не поддающийся контролю обмен количеством движения и энергией между объектом и масштабами и часами, определяющими систему отсчёта. Обратно, никакое устройство, пригодное для контроля над балансом количества движения и энергии, не допускает точного описания явлений, как цепи событий, локализованных в пространстве и времени».

Всё это совершенно верно при условии, что анализ поведения атомного объекта производится на основе классической механики (о чём сам Бор и говорит в следующей своей фразе). Но на самом деле лишь последний этап измерения (связанный обычно с действием какого-нибудь усилительного устройства) требует такого классического анализа. Предшествующее же поведение объекта, когда он находился ещё в фиксированных внешних условиях, может быть гораздо более точно проанализировано на основе квантовомеханических представлений. Поэтому нельзя согласиться с утверждением Бора, что «соотношения неопределённости явным образом указывают на ограниченность причинного рассмотрения». Соотношения неопределённости налагают ограничения на приме-

нимость классических моделей, но принцип причинности не составляет монополии классической физики, и отказ от классических моделей не означает отказа от причинности.

Переходя к перечислению положительных достижений квантовой механики, Бор как бы забывает о том, что он на предыдущих страницах придавал её математическому аппарату лишь чисто символическое значение и связывал его не со свойствами атомных объектов, а с координацией результатов измерений.

Бор пишет следующее:

«Квантовая механика представляет обобщение классической механики, позволяющее учитывать существование кванта действия. Рамки её достаточно широки для того, чтобы включать в себя объяснение наблюдаемых на опыте закономерностей, не поддающихся описанию классическим способом. Укажем здесь на характерную устойчивость атомов, наличие которой дало первый толчок к развитию квантовой механики. Кроме того, можно указать на своеобразные закономерности, наблюдаемые в системах, составленных из одинаковых частиц, например фотонов или электронов. Эти закономерности играют решающую роль в равновесном излучении и в свойствах вещества. Как известно, они адекватно отображаются свойствами симметрии волновых функций, представляющих состояния сложных систем».

В приведённой цитате Бор как бы переходит на материалистическую точку зрения — на точку зрения учёного-естествоиспытателя. Он говорит об объективных свойствах атомов (устойчивость), об объективно существующих закономерностях и об отображении их математическим аппаратом квантовой механики.

С этими высказываниями можно вполне согласиться. В то же время нельзя не видеть их противоречия с тем, что Бор говорил несколькими страницами выше.

Но на этой материалистической точке зрения Бор остаётся недолго. После разбора мысленного опыта, послужившего в своё время (1935 г.) предметом дискуссии между Бором и Эйнштейном, Бор возвращается к вопросу о предмете квантовой механики и говорит, что в квантовомеханическом описании «мы имеем дело с математически непротиворечивой схемой, которая подходит (в пределах своей области применимости) ко всякому измерительному процессу». Таким образом, Бор здесь опять придаёт квантовой механике значение схемы, применяемой для координации результатов измерительных процессов. Об отображении квантовой механикой объективных свойств реальных атомных объектов больше нет и речи.

Особенно ярко идеалистическая философская установка Бора проявляется в рекомендуемом им толковании понятия «явление». Бор пишет:

«Мы бы очень настаивали на том, чтобы слово „явление“ употреблялось только в ограниченном смысле. Слово „явление“ должно относиться только к наблюдениям, произведённым в точно определённых условиях, включая указания о всём опыте в целом».

Ввиду важности этого определения для характеристики философской позиции Бора мы приведём соответствующую цитату, (на которую одобрительно ссылается Паули в своей редакционной статье) также и в подлиннике: «As a more appropriate way of expression, one may strongly advocate limitation of the use of the word *phenomenon* to refer exclusively to observations obtained under specified circumstances, including an account of the whole experiment» (Dialectica, 7/8, 1948, стр. 317).

Проанализируем это определение. Во-первых, в нём отсутствует всякое указание на тот объект, который собственно и производит явление. Ссылка на объект заменена ссылкой на производимые наблюдения. Во-вторых, в нём не учтено, что собственно измерение составляет лишь последнюю стадию постановки опыта, а этой последней стадии должно предшествовать приготовление самого явления по возможности в чистом виде, т. е. в точно определённых условиях; последняя же стадия эти условия заведомо нарушает, о чём много раз в других местах говорит и сам Бор, когда упоминает о «неконтролируемом взаимодействии». В последних словах определения Бора подчеркнуто, что опыт должен рассматриваться в целом, т. е. без подразделения на стадии; повидимому Бор ставит это в связь с тем, что он говорил раньше о неделимости атомных процессов. Между тем, если отказаться от подразделения опыта на стадии, то получится противоречие даже в самих словах Бора, который, с одной стороны, говорит о точно определённых условиях, а с другой стороны, неоднократно подчёркивает, что с измерением связано «неконтролируемое взаимодействие» между объектом и прибором.

Ясно, что «точно определённые условия» и «неконтролируемое взаимодействие» могут относиться только к разным стадиям опыта.

Необходимость подразделения опыта на невозмущённое явление и на самый акт измерения ясна сама по себе. Ведь невозмущённое явление может происходить и в естественных условиях, на которые мы даже не можем повлиять (например, излучение атомов на какой-нибудь звезде).

Таким образом, предлагаемое Бором определение не отвечает самым основным научным требованиям и является ошибочным как с точки зрения философии, так и с точки зрения физики. Философская ошибка Бора очевидна. В угоду позитивистской идеалистической философии он стремится избежать даже упомин-

нения об объекте, подлежащем изучению в данном опыте; это нужно ему для того, чтобы рассматривать этот объект только как вспомогательное логическое построение, необходимое для координации показаний приборов. Если Бор и не говорит этого прямо, то он расчищает путь к такому толкованию, и по этому пути идут затем другие, более открытые, приверженцы идеалистической философии.

Но мы хотели бы здесь особенно подчеркнуть физическую ошибку Бора, которая, быть может, не столь очевидна, но не менее важна. Ведь именно путём неправильного толкования физических фактов зарубежные физики-идеалисты и пытаются обосновать свою философию.

Основную физическую ошибку Бора, которая отражается не только на данном им определении «явления», но и на его понимании квантовой механики и которая проходит через всю его статью, мы видим в следующем.

Бор игнорирует, что в физическом эксперименте помимо начальной и конечной стадий (приготовления объекта и собственно акта измерения) существует ещё и средняя стадия, когда определённым образом приготовленный объект находится в фиксированных внешних условиях.

Подразделение эксперимента на стадии не умозрительно, а вполне реально. Ему соответствует (в тех случаях, когда весь эксперимент проходит в лабораторных условиях) подразделение экспериментальной установки на приготовляющую, рабочую и регистрирующую части. Игнорируя среднюю стадию эксперимента, Бор как бы хочет отвлечь наше внимание от самой сущности явления, от той его части, которая может быть наиболее глубоко изучена методами квантовой механики. Ведь именно к этой средней стадии и применимо волновое уравнение квантовой механики, когда как приготовление объекта и результат измерения должны описываться на языке классической физики. Состояние объекта в средней стадии описывается волновой функцией. Состояние это характеризуется, как мы уже говорили, вероятностью того или иного потенциального поведения объекта при каждом из возможных внешних воздействий. Состояние даёт как бы настройку объекта, которая является чем-то вполне реальным, несмотря на то, что для определения этой настройки нужно её нарушить. То обстоятельство, что волновая функция характеризует поведение объекта не в классическом смысле, не самого по себе, а лишь по отношению к конкретному внешнему воздействию, позволяет говорить о несомненном характере волновой функции в отличие от абсолютного характера полей классической физики. Волновая функция представляет новую (по сравнению с классической физикой) форму описания состояния объекта.

Игнорируя среднюю стадию эксперимента, Бор хочет свести его к приготовлению и измерению, которые описываются на языке классической физики с учётом лишь соотношения неопределённостей. Тем самым он принижает роль квантовой механики (оставляя за ней только некий символический смысл) и преувеличивает значение соотношения неопределённостей. На самом деле это соотношение ограничивает применимость классической механики, но ничего не говорит о сущности квантовой механики.

Существенная часть квантовой механики, позволяющая глубже проникнуть в изучение свойств атомных объектов, формулируется не при помощи соотношения неопределённостей, а при помощи математического аппарата, включающего в себя операторы в гильбертовом пространстве, волновые уравнения, волновые функции и т. п. Соотношение неопределённостей для координат и количества движения является следствием аппарата квантовой механики, и лишь соотношение для энергии и времени, относящееся к акту измерения, вводится отдельно, причём и тут должно быть показано, что оно не противоречит уравнению Шредингера.

Переоценка соотношения неопределённостей приводит Бора к далеко идущей переоценке его принципа дополнительности. Первоначально под дополнительностью разумелось то положение вещей, которое вытекало непосредственно из соотношения неопределённостей: дополнительность относилась к неопределёностям в координате и в количестве движения (в смысле их обратной пропорциональности) и термин «принцип дополнительности» понимался как синоним соотношений Гейзенберга*). Очень скоро, однако, Бор стал видеть в своем принципе дополнительности некий универсальный принцип, ограничивающий не только возможности описания в духе классической физики, но и возможности всякого научного описания, и применимый не только в физике, но и в биологии, психологии, социологии и во всех науках. Такая точка зрения проводится и в разбираемой статье Бора (на последних страницах).

Ввиду явной необоснованности такой точки зрения мы её разбирать здесь не будем. Однако, поскольку термин «принцип дополнительности» потерял свой первоначальный смысл и стал употребляться как обозначение для несуществующих ограничений познания и для других неправильных понятий, лучше всего от него отказаться.

В заключительных словах своей статьи Бор возвращается к своей мысли о том, что идея дополнительности призвана заменить

*) В частности, в нашей статье в журнале «Под знаменем марксизма» № 1, за 1938 г., стр. 149, термин «принцип дополнительности» употребляется исключительно в смысле соотношений Гейзенберга.

собою прежнюю идею причинности и что квантовая механика осуществляет эту замену в области физики.

Нам кажется, однако, что квантовая механика доказывает как раз обратное. В ней найдены новые формы выражения принципа причинности, который наряду с другими принципами философии диалектического материализма останется надёжным руководителем в нашем стремлении к познанию природы.
